

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Fakultät für Maschinenwesen
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
Institut für Solarforschung, Lehrstuhl für solare Komponenten
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Hoffschmidt

Untersuchungen mit einer neuartigen Strömungsmesstechnik zur Visualisierung der Rückführung bei offenen volumetrischen Receivern

Masterarbeit

Kai Risthaus
Matrikelnummer: 294902

Erstprüfer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Hoffschmidt
Zweitprüfer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Pitz-Paal
Betreuender wiss. Mitarbeiter: Dipl.-Phys. Arne Tiddens

Aachen, Dezember 2015

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein neues Verfahren zur Visualisierung von Gasströmungen dargestellt. Mittels eines Tracers werden einem im Infraroten nicht aktiven Fluid dort Eigenschaften induziert, weshalb diese Methode hier Induzierte Infrarotthermographie (IIT) genannt wurde. Durch den Tracer emittiert oder absorbiert die Strömung Strahlung, die von einer Infrarotkamera detektiert wird. Das Verfahren wird an einem offenen volumetrischen Receiver demonstriert. Dazu wird Kohlenstoffdioxid als Tracer eingesetzt und die Emission der Strömung vor der Atmosphäre aufgezeichnet. Grundsätzlich ist die Temperatur im Hinblick auf die Strahlungsdichte der wichtigste Parameter, allerdings sind auch die Tracerkonzentration, die Strömungstiefe und der atmosphärische Druck relevant. Durch die Atmosphäre wird die Strahlungsdichte erheblich abgeschwächt. Die Sichtbarkeit der Strömung wurde durch die Subtraktion eines dynamischen Minimalbildes erhöht und das Rauschen durch den Einsatz des V-BM3D-Filters minimiert. Mittels einer Kreuzkorrelation wurden aus mehreren Strömungsbildern Geschwindigkeitsfelder erstellt.

Abstract

In this work a novel method for visualizing fluid flows is presented. Therefore a tracer is added to a non-participating gas, which makes the gas participating in the infrared. For this reason the method is called Induced InfraredThermography (IIT) here. Because of the tracer the gas is emitting or absorbing radiation in a certain wavelength spectrum that can be detected by an infrared camera. This technique is demonstrated by visualizing the flow in front of an open volumetric receiver, which is quite challenging for a measurement technique. For this experiment carbon dioxide is added to the partly circulated air and the thermal emission is detected by an infrared camera. Basically, the temperature influences the spectral density most but the tracer concentration, the pressure and the depth of the gas have a certain influence, too. By traversing the atmosphere the spectral density is attenuated significantly. For this reason the signal of the flow has to be enhanced by subtraction of a dynamic minimal-image. Noise is efficiently reduced by the V-BM3D-filter. The displacement per image is determined by a cross correlation and a velocity field is calculated.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden.

Aachen, den _____

Kai Risthaus

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Stand der Technik	4
2.1. Geschwindigkeitsnutzung	4
2.2. Tracerbetrachtung	6
2.2.1. Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)	6
2.2.2. Laser-Fokus-Anemometrie (LFA)	7
2.2.3. Particle Image Velocimetry (PIV)	7
2.2.4. Densitiy Tagging Velocimetry (DTV)	9
2.2.5. Molecular Tagging Velocimetry (MTV)	10
2.3. Nutzung unterschiedlicher Brechungsindizes	10
2.3.1. Background Oriented Schlieren (BOS)	10
2.3.2. Laser-Speckle-Density Photometry (LSDP)	12
2.3.3. Schlieren Particle Image Velocimetry (Schlieren PIV)	13
2.3.4. Schattenverfahren	14
2.3.5. Interferometrie	14
2.4. Infrarot-Thermographie	15
2.4.1. Festkörperstrahlung	15
2.4.2. Gasstrahlung	17
2.5. Beurteilung bzgl. der Anwendung auf Solartürme	20
2.6. Exkurs zu Infrarotkameras	22
3. „Induced Infrared Thermography“	24
3.1. Verfahrensbeschreibung	24
3.2. Auswahl eines Tracergases	25
3.3. Strahlungseigenschaften und Atmosphäreneinfluss	26
3.4. IIT zur Bestimmung von Temperaturen	32
3.5. Fazit	34
4. Methodik zur Auswertung	35
4.1. Nutzung von IRBIS 3 professional	35
4.2. Visualisierung	36
4.2.1. Geometrische Korrektur	36
4.2.2. Kalibrierung des Bildes	37
4.2.3. Hintergrundbild entfernen	37
4.2.4. Glätten/Smoothing	38
4.2.4.1. Bewertung	42
4.2.5. Image Enhancement	43
4.3. Geschwindigkeitsbestimmung	44

5. Messungen	46
5.1. Messung an der Forschungsebene	46
5.2. Messung am Hauptreceiver	48
5.2.1. Solarer Betrieb	50
5.2.2. Gasbrennerbetrieb	50
5.3. Messung am Kraftwerksschornstein	52
6. Auswertung	54
7. Ergebnisse	59
7.1. Auswertungsmethodik	59
7.2. Messungen	62
7.3. Anwendung des PIV Algorithmus	64
8. Einschränkungen der IIT	67
9. Zusammenfassung und Ausblick	69
A. Zusammensetzung trockener Luft	73
B. Daten zur Kamera	74
C. Daten zum Filter	76
D. Absorptionskoeffizienten	77

Nomenklatur

Abkürzungen

	Bedeutung
ARR	Air-return-ratio, Luftrückführtrate
BOS	Background Oriented Schlieren, Verfahren zur Geschwindigkeitsfeldbestimmung
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CSP	Concentrated Solar Power - dt. Konzentrierte Solarstrahlung
DL	Digitallevel, ein Maß für die detektierte Strahlungsintensität einer IR-Kamera
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DTV	Density Tagging Velocimetry, Verfahren zur Geschwindigkeitsbestimmung
HAPI	HITRAN Aplication - eine Phythonbibliothek zur Nutzung von HITRAN
HITRAN	High resolution Transition- eine Datenbank für Molekülübergänge
IIT	Induced Infrared Thermography, in dieser Arbeit vorgestelltes Verfahren
IR	Infrarot
KWIR	Kurzwelleninfrarotbereich von 0,7-2 µm
L2F	Laser-Fokus-Anemometrie, Verfahren zur Bestimmung einer Geschwindigkeitskomponenten
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie, Verfahren zur Bestimmung einer Geschwindigkeitskomponenten
LSDP	Laser Speckle Density Photometry, Verfahren zur Geschwindigkeitsfeldbestimmung
LSV	Laser Speckle Velocimetry. Verfahren zur Geschwindigkeitsfeldbestimmung
LWIR	Langwelleninfrarotbereich von 7 bis 14 µm
MTV	Molecular Tagging Velocimetry, Verfahren zur Geschwindigkeitsbestimmung
MWIR	Mittelwelleninfrarotbereich ca. 2-5µm

	Bedeutung
NETD	Noise equivalent temperature differenz, ein Maß für die Genauigkeit einer Infrarotkamera
PIV	Partikle Image Velocimetry , Verfahren zur Geschwindigkeitsfeldbestimmung
PTV	Particle Tracking Velocimetry, Verfahren zur Geschwindigkeitsbestimmung
PV	Photovoltaik
STJ	Solarturm Jülich

Indizes

Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
C	Konzentration	-
c_0	Lichtgeschwindigkeit	m/s
E	Energie	J
e	Energieniveau	-
f	Formfunktion oder Originalbild	-
g	Aufnahme	-
h	Hintergrund	-
I	Intensität	W/sr
k	Boltzmann-Konstante oder Absorptionskoeffizient	J/K $1/cm$
L	Strahldichte	$W/m^2/sr$
l	Länge	m
M	Fläche	m^2
n	Rauschen	-
o	Offset	-
p	Druck	bar
S	Linienintensität	$cm^{-1}/(Molekül \cdot cm^2)$
s	Strömung	-
T	Temperatur	K oder °C

Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
α	Absorptionsgrad	-
β	Extinktionskoeffizient	1/cm
Δ	Differenz	-
ϵ	Emissionsgrad	-
θ	Polarwinkel	°
λ	Wellenlänge	µm
κ	Absorptionskoeffizient	1/cm
μ	Mittelwert	
π	Kreiszahl	-
σ	Stefan-Boltzmann Konstante Steukoeffizient Standardabweichung	$\frac{W}{m^2 K^4}$ 1/cm -
τ	Transmissionsgrad	-
Ω	Raumwinkel	sr
Φ	Phasenfunktion	-
ϕ	Azimutwinkel	°

Abbildungsverzeichnis

2.1. Pitot-Rohr	5
2.2. Pulsdrahtsonde	6
2.3. Laser-Doppler-Anemometer (LDP)	7
2.4. Laser-Fokus-Anemometer (LFA)	8
2.5. Aufbau eines Particle Image Velocimetry (PIV)-Versuchs	8
2.6. Aufbau eines Background Oriented Schlieren Versuchs (BOS)	11
2.7. Flussdiagramm der BOS zur Dichtefeldbestimmung	12
2.8. Aufbau der Laser-Speckle-Photographie (LSP)	13
2.9. Aufbau eines Schlieren PIV Versuchs	13
2.10. Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers	14
2.11. Planck'sches Gesetz	16
2.12. Definition des Raumwinkels	17
2.13. Energiezustände	18
2.14. Gesamtemissionsgrad von CO_2	20
2.15. BOS-Messung eines Helikopterrotors	21
2.16. Schmatische Darstellung einer Infrarotkamera	23
3.1. Transmissionsspektrum der Erdatmosphäre	27
3.2. Vergleich von Schwarzkörper und Gasstrahlung	28
3.3. Änderung des spektralen Emissionsgrades über die Temperatur	30
3.4. Einfluss von Temperatur, Konzentration und Wegstrecke durch die Atmosphäre auf die Strahldichte	31
3.5. Abhängigkeit des effektiven Emissionsgrad von der Temperatur	31
3.6. Abhängigkeit der normierten Strahldichte von der Weglänge durch die Atmo- sphäre	32
3.7. Strahlungsbilanz um eine IR-Kamera	33
4.1. Haar Wavelet	40
4.2. Vorgehen beim BM3D-Algorithmus	42
4.3. Colormap Jet	44
5.1. Versuchsaufbau am Hauptreceiver	47
5.2. Innenansicht der Forschungsebene	48
5.3. Frontale und Seitenansicht der Forschungsebene	49
5.4. Parameter am Tag der Messung an der Forschungsebene	49
5.5. Parameter am Tag der Messung am Hauptreceiver	50
5.6. Vereinfachtes Schema des Gasbrennerversuchs	51
5.7. Schornsteine des Braunkohlekraftwerks im visuellen Bereich	53

6.1. Sequenz der Strömung aus dem Receiver der Forschungsebene	55
6.2. Abweichungen der Strömungsform an Forschungsebene	56
6.3. Sequenz der Strömung am Hauptreceiver	56
6.4. Messung am Hauptreceiver von Position Mitte	57
6.5. Messung im Gasbrennerbetrieb	58
6.6. Schornsteine des Braunkohlekraftwerks im IR-Bereich	58
6.7. Vergleich einer Aufnahme mit und ohne Filter	58
7.1. Auswirkungen der einzelnen Auswertungsschritte	60
7.2. Bildartefakt durch Abzug des Minimalbildes	61
7.3. Bewertungskriterien zur Filterauswahl	61
7.4. Vergleich der Receivergeometrien	63
7.5. Geschwindigkeitsfeld am Hauptreceiver	65
7.6. Geschwindigkeitsfeld an der Forschungsebene	66
8.1. Vereinfachter Strahlengang bei der Abbildung eines Gegenstandes	67
B.1. Kameraeigenschaften	74
B.2. Kameraeigenschaften (fortgesetzt)[Inf10]	75
C.1. Transmissionsspektrum der eingesetzten Filters	76
D.1. Absorptionskoeffizient des CO_2	77
D.2. Absorptionskoeffizient von Wasser	77
D.3. Absorptionskoeffizient von Stickstoff	78
D.4. Absorptionskoeffizient von Sauerstoff	78

Tabellenverzeichnis

2.1. Übersicht der Eignung bestehender Messmethoden auf den STJ	22
4.1. Übersicht über die betrachteten Filter	39
8.1. Berechnungen zur Abbildung der IR-Kamera	68
A.1. Zusammensetzung der trockenen Luft nach Vollmer[VM10, S. 53]	73

1. Einleitung

Um eine Erhöhung der durchschnittlichen Erdtemperatur auf 2°C zu begrenzen und damit erwartete negative Umweltveränderungen zu vermeiden, ist es laut der internationalen Energieagentur [IEA15] nötig, den heutigen globalen Kohlenstoffdioxid (CO_2)-Ausstoß in der Energieerzeugung bis zum Jahr 2050 um 90% zu reduzieren. Dieser Ausstoß resultiert aus der Verbrennung fossiler Energieträger in Kohle- oder Gaskraftwerken. Selbst unter Vernachlässigung des Klimaaspektes, den man eventuell durch die Abscheidung und Speicherung des CO_2 entschärfen könnte, bleiben diese Energieträger aufgrund ihrer Begrenztheit problematisch. Zum einen steigen die Förderkosten mit voranschreitendem Abbau der Lagerstätten und zum anderen ist die maximal mögliche wirtschaftliche Förderleistung beschränkt, so dass ab einem gewissen Zeitpunkt die Nachfrage - trotz bestehender Ressourcen - nicht mehr gedeckt werden kann. Im Hinblick auf eine weiter wachsende Weltbevölkerung und einen steigenden Energiebedarf der Schwellenländer werden diese Probleme weiter an Bedeutung gewinnen. Die Nutzung regenerativer Energiequellen wird vor diesem Hintergrund zunehmend attraktiv, zumal erwartet wird, dass erneuerbare Energiequellen durch technische Weiterentwicklungen zukünftig ökonomisch stärker mit fossil befeuerten Kraftwerkstypen konkurrieren können.[ISE15][Qua13][Gro03][Wes13]

Solarstrahlung ist die größte regenerative Energiequelle auf der Erde und die jährlich einstrahlte Leistung übertrifft den Weltprimärenergiebedarf ca. um das 11.000 fache. Bei der direkten Nutzung der Solarstrahlung zur Stromerzeugung stehen zur Zeit zwei Technologien zur Verfügung: zum einen die Photovoltaik (PV) und zum anderen Solarthermie. Photovoltaik wandelt die Strahlungsteilchen direkt in elektrische Energie, während Solarthermie die Strahlungsenergie zunächst in thermische Energie und diese dann in einem konventionellen Kraftwerksprozess in elektrische Energie umwandelt. Es wird erwartet, dass Photovoltaik Strom zu etwas geringeren Kosten erzeugen kann als Solarthermie in Form von konzentrierter Solarstrahlung (im Folgenden CSP aus dem englischen: „Concentrated Solar Power“) [Gro03, ISE15]. Allerdings bietet CSP die Vorteile, dass Energiespeicher im Vergleich zur Photovoltaik kostengünstig umgesetzt werden können und sich diese Methode direkt für verfahrenstechnische Anwendungen eignet. Aufgrund der Speichermöglichkeit werden CSP und PV zwar bei einzelnen Projekten miteinander konkurrieren, sich global gesehen aber ergänzen. Deshalb prognostiziert die internationale Energieagentur einen Anstieg der installierten Leistung im CSP-Bereich von derzeit ungefähr 4 auf 1000 GW im Jahr 2050. [IEA14][Qua13]

Bei den CSP-Technologien werden punkt- und linienfokussierende Systeme unterschieden. Parabolrinnen sind linienfokussierend, Solartürme und Solardishes sind Vertreter punktfokussierender Systeme. Die punktfokussierenden Systeme können die Solarstrahlung stärker konzentrieren und damit höhere Prozesstemperaturen erreichen, was nach Carnot zu höheren Wirkungsgraden führt. Die Turmtechnologie bietet das größte Kostensenkungspotential [IEA14]. Nach Romero et al. [RBP02] haben hierbei drei Arten Aussicht auf kommerziellen Erfolg:

Flüssigsalzreceiver, offene oder geschlossene Luftreceiver und Sattdampfreceiver. Die in dieser Arbeit vorgestellte Messtechnik zielt vor allem auf offene Luftreceiver ab, weshalb die anderen Technologien hier nicht weiter beschrieben werden sollen.

Das Funktionsprinzip von offenen volumetrischen Receivern sei hier am Beispiel des Solarturms Jülich (STJ), dem zur Zeit einzigen Referenzkraftwerk für diese Technologie mit einer Nennleistung von 1,5 MW, beschrieben. Sonnenlicht wird auf einer Fläche von ca. 8 ha mit über 2000 beweglichen Spiegeln, den Heliostaten, auf den Strahlungsempfänger, der auch Receiver genannt wird, fokussiert. Der Receiver besteht aus mehr als tausend Absorbermodulen, die eine poröse keramische Struktur aufweisen. Luft wird durch diese Struktur gesogen, erwärmt sich auf bis zu 700°C und kühlt gleichzeitig die Absorbermodule dabei. Hierbei wird idealerweise die höchste Lufttemperatur am Ende des Absorbers erreicht und nicht auf der äußeren Receiverfläche, die für die Strahlungs- und Konvektionsverluste maßgeblich ist. Dieser Effekt, der volumetrischer Effekt genannt wird, ist neben dem frei verfügbaren Wärmeträgermedium Luft ein großer Vorteil der offenen volumetrischen Receiver. Die erhitzte Luft kann danach in einen Speicher geführt werden oder über Wärmetauscher einen konventionellen Wasserdampf-Prozess antreiben. Nach dem Durchströmen der Wärmetauscher oder des Speichers weist die Luft immer noch Temperaturen von 100-200°C auf. Um die Wärmeenergie vollständig zu übertragen, wären unendlich große Wärmetauscher notwendig. Die warme Luft wird zwischen den Absorbermodulen ausgeblasen, um die Absorber zu kühlen und einen Teil der verbleibenden Wärmeenergie zu nutzen. Idealerweise wird die ausgeblasene Luft, im Folgenden Rückführluft genannt, komplett wieder eingezogen, was aus verschiedenen Gründen bei dem heutigen System nicht möglich ist. Die „Air Return Ratio“ (ARR) misst, welcher Anteil der Rückführluft wieder eingesogen werden kann. [AH10, KSH⁺09]

Ahlbrink [Ahl13] führt im Wesentlichen drei Verbesserungsmöglichkeiten für diesen Turmtyp auf:

1. Optimierung der Receiverstruktur
2. Eine gleichmäßige Bestrahlung des Receivers
3. Erhöhung der Luftrückführrate

Diese Arbeit soll zur Erhöhung der Luftrückführrate beitragen. Die Luftrückführrate kann mit einem Indikatorgas¹ bestimmt werden, wobei der Rückführluft ein weiteres, leicht detektierbares, Gas zugegeben wird. Um die Lufteigenschaften nicht durch das Tracer-Gas stark zu beeinflussen, wird dieses nur in geringen Mengen hinzugefügt. Anschließend wird die Konzentration des Tracer-Gases statisch oder dynamisch bestimmt. Bei der statischen Messung wird das Tracer-Gas kontinuierlich zugeführt und nach dem Einsaugen gemessen. Das dynamische Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass das Gas nur einen kurzen Moment zugegeben wird und dann die Änderung dieses Konzentrationspulses gemessen wird [TRSH15, Off14]. Dieses Verfahren eignet sich gut, um die Effizienz der Luftrückführung zu bestimmen, kann allerdings keine konkreten Verbesserungsmöglichkeiten aufzeigen. Um Verbesserungspotentiale sichtbar

¹Im Folgenden wird das Indikatorgas gemäß der internationalen Literatur als Tracer bezeichnet.

zu machen, sind das Temperatur- und Strömungsfeld hilfreich. Erste Versuche hierzu wurden von Maldonado [MQ15] an einem Prüfstand und über CFD-Simulationen von einem Absorber bzw. 4 Absorbern im Verbund durchgeführt. Der Grund für den kleinen Maßstab ist, dass die Strömung am Receiver mit der heutigen Rechenkapazität nicht in einem hinnehmbaren Zeitraum simuliert werden kann. Außerdem ist das eingesetzte Messverfahren, die Particle Image Velocimetry (2.2.3), wie im nächsten Kapitel gezeigt werden wird, nicht für kommerzielle Receiver einsetzbar.

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein neues Messverfahren vorgestellt werden, das nicht auf den Labormaßstab beschränkt ist und die Strömung auch bei größeren Receivern darstellen kann. Grundlegend hierfür ist die klassische Infrarotthermographie, die in einer modifizierten Form angewendet wird. Diese Form wird hier „Induced Infrared Thermography“ (dt. Induzierte Infrarot Thermographie, IIT) genannt. Bei der IIT wird einem Gasstrom, der in der ursprünglichen Form nicht von einer Infrarotkamera detektiert werden kann, ein infrarotaktives Gas zugegeben. Dann wird die Wärmestrahlung der aktiven Komponente mit einer Infrarotkamera gemessen und so die Gasströmung visualisiert. Welches infrarotaktive Gas zugemischt wird, hängt im Wesentlichen von den erwarteten Temperaturbereichen ab. Weiterhin sollte das Gas natürlich nicht gesundheitsgefährdend, teuer oder besonders umweltschädlich sein. Zur Visualisierung der Rückföhlluft am STJ wird CO_2 eingesetzt.

Im nächsten Kapitel wird der Stand der Messtechnik widergespiegelt und gezeigt, dass derzeit kein Messverfahren die Strömung vor einem Solarturmreceiver in einfacher Weise darstellen kann. Darauf folgt die Beschreibung der IIT, die diese Aufgabe erfüllen kann. In Kapitel 4 wird die Vorgehensweise bei der Auswertung gezeigt. Es wurden Daten an 3 Messtagen am STJ aufgenommen, was in Kapitel 5 beschrieben wird. In Kapitel 6 und 7 werden die ermittelten Daten ausgewertet bzw. die Ergebnisse dargestellt. Einschränkungen der IIT werden in Kapitel 8 aufgezeigt. Abschließend wird die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick für die Nutzung der IIT gegeben, Kapitel 9.

2. Stand der Technik

Dieses Kapitel soll eine Übersicht über den Stand der Technik zur Visualisierung von Gasströmungen geben. Verfahren, die auf eine Geschwindigkeitsfeldbestimmung abzielen, werden hier ebenfalls aufgeführt, da die Geschwindigkeitsfeldbestimmung die Visualisierung der Strömung in gewisser Weise voraussetzt. Auch Messverfahren, die nur punktweise Messergebnisse erzeugen, werden angeschnitten, weil aus hinreichend vielen Messpunkten ebenfalls ein Strömungsbild erstellt werden kann. Um einen Fluidstrom sichtbar zu machen, muss dieser grundsätzlich von der Umgebung verschiedene Eigenschaften aufweisen. Die in diesem Kapitel beschriebenen Methoden lassen sich danach einordnen, welche der folgenden Eigenschaften sie nutzen:

- Die Geschwindigkeit an sich (Abschn. 2.1)
- Tracerbestandteile, das können in der Strömung natürlich vorkommende Teilchen oder zugegebene Teilchen bzw. auch Eigenschaftsänderungen sein (Abschn. 2.2)
- Ein unterschiedlicher Brechungsindex, der durch eine unterschiedliche Dichte hervorgerufen werden kann (Abschn. 2.3.5)
- emittierte Strahlung, die aufgrund unterschiedlicher Temperaturen oder Emissionsgrade zu Stande kommt (Abschn. 2.4)

Zunächst werden die Verfahren beschrieben, die die Geschwindigkeit oder dadurch direkt beeinflusste Eigenschaften ausnutzen. Dies sind die invasiven Verfahren (2.1). Daraufhin werden Verfahren, die auf Tracer-Partikel oder Störungen, die entweder ohnehin in der Strömung vorhanden sind oder hinzugegeben bzw. erzeugt werden, behandelt. Hierbei werden die Laser-Doppler-Anemometrie (2.2.1), die Laser-Fokus-Anemometrie (2.2.2), die Particle Image Velocimetry (2.2.3), die Density Tagging Velocimetry (2.2.4) und die Molecular Tagging Velocimetry (2.2.5) beschrieben. Die dritte Gruppe bilden Methoden, die den Brechungsindex berücksichtigen. Darunter fallen das Background Oriented Schlieren Verfahren (2.3.1), die Laser-Speckle-Density Photometry (2.3.2), die Schlieren Particle Image Velocimetry (2.3.3), Schattenverfahren (2.3.4) und die Interferometrie (2.3.5). Abschließend wird die Infrarot-Thermographie betrachtet (2.4) und diskutiert, welche Verfahren sich für die konkrete Anwendung an einem Solarturm eignen (2.5). Ein Exkurs zur Infrarotkameras (2.6) bildet den Übergang zum nächsten Kapitel.

2.1. Geschwindigkeitsnutzung

In diesem ersten Abschnitt sollen mehrere Verfahren kurz angeschnitten werden, die Komponenten in die Strömung einbringen. Die genannten Verfahren dienen zur Geschwindigkeitsmessung an einem oder zwischen zwei Punkten.

Mit einem **Pitot-Rohr** lässt sich aus der Differenz zwischen statischen Druck und Staudruck die Strömungsgeschwindigkeit bestimmen. Abbildung 2.1 zeigt schematisch die Messung. Die

Geschwindigkeit kann dann aus der Bernoulli-Gleichung ($p = p_0 + \frac{\rho}{2}u_\infty^2$) berechnet werden, wobei p den Staudruck, p_0 den statischen Druck, ρ die Fluidichte und u_∞ die Strömungsgeschwindigkeit bezeichnet und hydrostatische Druckkräfte vernachlässigt werden. Drucksonden können zeitlich gemittelte Strömungsgeschwindigkeiten mit hoher Genauigkeit bestimmen [Nit06, S. 45ff.] [Sch04, S.65ff.]. Zanoun et. al benutzten z.B. ein Pitot-Rohr zur Untersuchung von Kanal- und Rohrströmungen. Außerdem werden Pitot-Rohre bei Flugzeugen zur Geschwindigkeitsbestimmung benutzt [Sch04, S. 61].

Hitzdrahtanemometer dienen zur Messung von zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten und von Schwankungsgeschwindigkeiten. Die Strömungsgeschwindigkeit wird über konvektive Verluste an einem beheizten Draht bestimmt. Dazu wird ein Hitzdraht, der elektrisch auf eine konstante Temperatur geregelt wird, von dem Fluid umströmt und die benötigte Heizleistung gemessen. Das Gleichsetzen der Energiebilanz um den Hitzdraht mit der Heizleistung ergibt unter Vernachlässigung von Leitungs- und Strahlungsverlusten: $\frac{U^2}{R} = F\alpha(T_S - T_F)$. Hierbei ist U die Heizspannung, R der Widerstand des Drahtes, F die konvektiv umströmte Drahtfläche, α der Wärmeübergangskoeffizient, T_S die Drahttemperatur und T_F die Fluidtemperatur. Der Wärmeübergangskoeffizient ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und somit kann durch Messung der Verlustleistung und unter Annahme einer konstanten Strömungstemperatur das Kingesche Gesetz angewendet werden: $U^2 = A + Bu^n$, A und B sind hierbei Konstanten, die sich durch Kalibrierungen ergeben, u ist die gesuchte Strömungsgeschwindigkeit, n ist der Geschwindigkeitsexponent, der z.B. bei Annahme laminarer Strömung zu 0,5 genähert werden kann. [Nit06, S. 49ff.] Trotz des Alters dieses Verfahrens, das Anfang des letzten Jahrtausends entwickelt wurde [CB76], findet es heute immer noch breite Verwendung. So hat Kovasznay [Kov12] bspw. die Hitzdrahtanemometrie zur Messung von Überschallströmungen verwendet.

Bei der **Pulsdrahtanemometrie** wird die Geschwindigkeit aus der Zeitmessung zwischen Erzeugung und Empfang von thermischen Pulsen bestimmt. Ein Sendedraht erzeugt in der Regel thermische Pulse in einem Frequenzbereich von 5-10 Hz über eine Dauer von 0,5 bis 50 μ s. Durch den großen Unterschied zwischen Pulsdauer und Pulsfrequenz ist gewährleistet, dass sich der Sendedraht zwischen zwei Pulsen wieder abkühlt. Erreicht das erhitzte Fluid einen

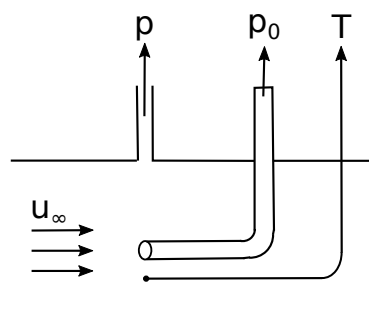


Abbildung 2.1.: Geschwindigkeitsmessung mit einem Pitot-Rohr. Die Geschwindigkeit kann dabei über die Differenz des statischen Drucks p und des dynamischen Drucks p_0 berechnet werden. (Abbildung nach [Nit06, S. 46])

Empfängerdraht, wird dort kurzfristig der elektrische Widerstand messbar verändert. In Abbildung 2.2 ist der Aufbau einer Pulsdrahtsonde dargestellt. Es werden je nach Fluidgeschwindigkeit 500 bis 5000 Einzelmessungen gemittelt, um eine Geschwindigkeit anzugeben. Das Auflösungsvermögen nimmt bei Geschwindigkeiten von $u > 15 \frac{m}{s}$ deutlich ab und erlaubt keine sicheren Messungen mehr. [Nit06, S. 56ff.] Als Anwendungsbeispiel sei hier die Untersuchung zur Bewegung von Sanddünen von Castro [CW94] genannt.

2.2. Tracerbetrachtung

2.2.1. Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)

Bei der Laser-Doppler-Anemometrie wird das an Partikeln gestreute Licht gemessen, um die Geschwindigkeit der Partikel zu bestimmen. Der Aufbau ist in Abbildung 2.3 gezeigt. Der Strahl eines Lasers wird hier geteilt und die beiden Teilstrahlen werden wieder am Messpunkt zusammengeführt. Sich durch diesen Punkt bewegend Teilchen streuen das Laserlicht und verschieben durch ihre Geschwindigkeit gemäß dem Dopplereffekt die Frequenz des Lichtes. Das gestreute Licht wird an zwei Stellen detektiert und über die Frequenzverschiebung kann dann die Geschwindigkeit bestimmt werden. Allerdings kann hiermit nicht das Vorzeichen der Geschwindigkeit bestimmt werden, weshalb durch die Bragg-Zelle mindestens ein Teilstrahl auch ohne Streuung eine Frequenzverschiebung erfährt. [Eck97, S. 142 ff.]

Mit der LDA lässt sich nur eine Geschwindigkeitskomponente in einem Punkt bestimmen. Um mehrere Komponenten zu erhalten, muss man entweder die Apparatur drehen oder mehrere LDA einsetzen. Benutzt man mehrere LDA, lassen sie sich prinzipiell durch Verwendung unterschiedlicher Frequenzverschiebungen, unterschiedlicher Wellenlängen oder, bei zwei Systemen, durch 90° aufeinanderstehenden Polarisations Ebenen koppeln. [Eck97, S. 142 ff.], [Nit06, S. 59ff.] Harteveld et al. benutzten zum Beispiel die LDA um eine Blasenströmung zu untersuchen. [HMOVdA05]

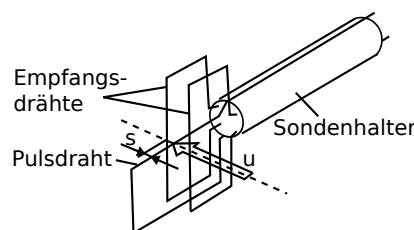


Abbildung 2.2.: Aufbau einer Pulsdrahtsonde. Der Pulsdraht erhitzt das strömende Fluid und die Temperaturerhöhung wird an einem der Empfängerdrähte erfasst. (Abbildung nach [Nit06, S. 56])

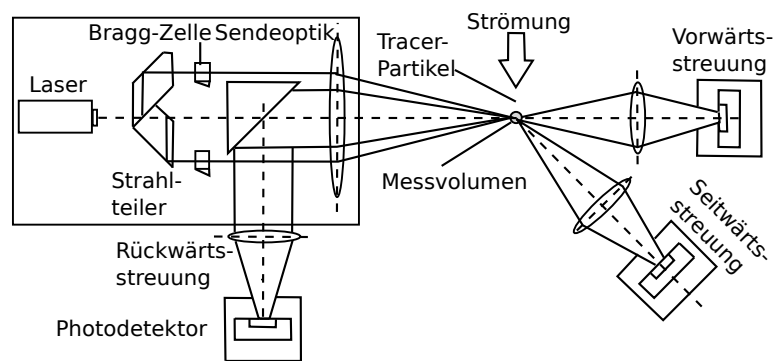


Abbildung 2.3.: Aufbau Laser-Doppler-Anemometrie nach [Nit06]. Ein Laserstrahl wird geteilt, mindestens ein Teilstrahl in der Frequenz verschoben und am Messpunkt wieder zusammengeführt. Sich bewegende Teilchen im Messpunkt streuen das Licht aufgrund des Dopplereffekts. Das Interferenzmuster der beiden Teilstrahlen wird aufgenommen und darüber die Strömungsgeschwindigkeit berechnet.

2.2.2. Laser-Fokus-Anemometrie (LFA)

Die Laser-Fokus-Anemometrie funktioniert prinzipiell wie eine Lichtschranke und kann somit die Geschwindigkeitskomponente auf der Strecke zwischen zwei Laserstrahlen messen. Das Verfahren wurde erstmal 1968 von Thompson vorgeschlagen und 1974 von Schodl optimiert. Der Aufbau eines Laser-Fokus-Anemometers ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Ein Laserstrahl wird durch ein spezielles Prisma in zwei parallele Teilstrahlen gespalten und auf den Messpunkt fokussiert (vgl. B in Abbildung 2.4). Das von Partikeln beim Durchqueren der Lichtschranke zurückgestreute Licht wird durch eine entsprechende Optik auf zwei Detektoren gelenkt und die Zeit zwischen dem Auslösen der beiden Detektoren gemessen. Die Laserstrahlen haben typischerweise im Messpunkt einen Abstand von ca. 200 μm und einen Durchmesser von ca. 10 μm . Aufgrund dieser starken Bündelung können kleinere Teilchen als bei der Laser-Doppler-Anemometrie detektiert werden, nämlich Teilchen mit einem Durchmesser ab 0,2 μm , was etwa zwei Größenordnungen kleiner ist als bei der LDA. Aus diesem Grund reichen in der Regel die in einem Fluid natürlich vorkommenden Partikel zur Geschwindigkeitsbestimmung aus. Da Partikel eventuell nur einen Laserstrahl durchqueren, weil sie sich z.B. nicht auf der Lichtschrankenebene bewegen und damit falsche Geschwindigkeiten bestimmt werden würden, wird über eine größere Anzahl von Geschwindigkeiten, gewöhnlicher Weise etwa 5000, gemittelt. Durch diese Mittlung ist die Messzeit bei diesem Verfahren deutlich größer als beim LDA. [Eck97, S. 177f.],[Nit06, S. 66ff.] Die LFA wurde bspw. von Ueki et al. [UIS05] angewendet, um das Einspritzverhalten von Dieselkraftstoff zu untersuchen.

2.2.3. Particle Image Velocimetry (PIV)

Das PIV-Verfahren ist ein Standardverfahren zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern. Da in optisch homogenen Medien keine signifikanten Wechselwirkungen zwischen Licht und

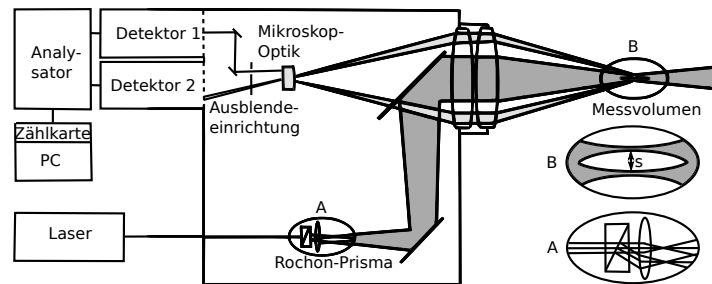


Abbildung 2.4.: Aufbau Laser-Fokus-Anemometrie nach [Nit06]. Ein Laserstrahl wird derart geteilt, dass sich im Messvolumen zwei Lichtschranken ergeben (gezeigt in Punkt B). Die Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich über den Abstand der Lichtschranken und die Zeitdifferenz zwischen dem Auslösen der Lichtschranken.

dem Medium auftreten, werden beim PIV-Verfahren Partikel dem Fluid zugegeben [Wes97]. Die Partikel werden in einer Ebene pulsierend beleuchtet, wobei die Pulse mit einer Kamera synchronisiert sind und somit ein Bild pro Puls entsteht. Durch den Vergleich von zwei sequentiellen Aufnahmen kann dann mit Hilfe der Pulsdauer die Geschwindigkeit der Partikel bestimmt werden. Abbildung 2.5 zeigt den Aufbau einer PIV-Messung. [Cho89]

Ideale Partikel folgen exakt der Bewegung des Fluids, ändern dabei die Strömung oder Fluideigenschaften nicht und wechselwirken nicht miteinander [Wes97]. Für die Geschwindigkeitsbestimmung werden weiterhin folgende Annahmen getroffen:

- Die Partikelbewegung ist zweidimensional und durch die Laserbeleuchtung begrenzt
- Die Bewegung der Partikel ist während eines Lichtpulses vernachlässigbar
- Der räumliche Gradient der Geschwindigkeit ist im Betrachtungsfenster vernachlässigbar [Cho89]

Die Auswertung funktioniert so, dass ein kleiner Ausschnitt aus einem ersten Bild, das Betrachtungsfenster, mittels einer Kreuzkorrelation in der nachfolgenden Aufnahme gesucht wird, um

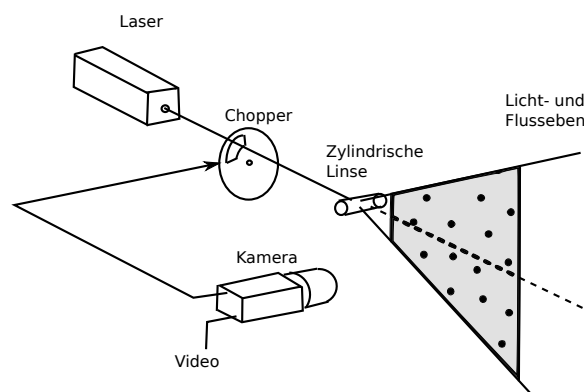


Abbildung 2.5.: Aufbau eines PIV-Versuchs. Partikel werden der Strömung zugegeben nach [WG91]. Ein pulsierender Laser, hier durch einen mechanischen Chopper realisiert, beleuchtet eine Ebene. Die Kamera macht zur Zeit eines Lichtpulses eine Aufnahme, die anschließend digital analysiert wird.

so die Positionsänderung der Partikel bzw. über die Positionsänderung in Verbindung mit der Aufnahmefrequenz die Geschwindigkeit der Partikel zu berechnen. Die Kreuzkorrelation lässt sich wie folgt bestimmen:

$$\phi_{fg}(m, n) = \frac{\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} f(k, l) g(k + m, l + n)}{\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} f(k, l) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} g(k, l)} \quad (2.1)$$

f ist hierbei die Intensität der ersten Aufnahme, g die der nachfolgenden Aufnahme an den Koordinaten k und l im Bild und m und n sind die Positionsänderungen. Ein hoher Wert der Kreuzkorrelation, d.h. nahe eins, bedeutet, dass viele Partikel zwischen den beiden Aufnahmen um m bzw. n verschoben wurden und somit, dass sich die Partikel zwischen den beiden Bildern um m und n bewegt haben. [WG91] Durch die Kreuzkorrelation lassen sich die Verschiebungen der Partikel nur auf einen Pixel genau bestimmen. Eine höhere Genauigkeit lässt sich erzielen, wenn man zwischen den Pixeln interpoliert [Wes93]. Die Geschwindigkeitsfelder enthalten auch bei sorgfältiger Durchführung Fehler. Fehlerhafte Vektoren weisen unphysikalisch hohe Geschwindigkeits- oder Richtungsänderungen auf und lassen sich durch den Vergleich mit ihren Nachbarvektoren bestimmen und entfernen. PIV sollte dadurch eine Genauigkeit von ca. 1% ermöglichen. [Wes93]

Das PIV-Verfahren unterscheidet sich von der Particle Tracking Velocimetry (PTV) im Labormaßstab und der Laser Speckle Velocimetry (LSV) prinzipiell nur über die Konzentration der Partikel. Bei der PTV ist die Konzentration der Partikel sehr niedrig. Man kann die einzelnen Partikel erkennen und aufgrund des großen Abstands zwischen den Partikeln die Bewegung jedes Teilchens nachvollziehen. Die PIV weist eine höhere Partikelkonzentration auf, so dass man zwar einzelne Partikel erkennen, die Bewegung zwischen zwei Bildern jedoch nicht eindeutig bestimmen kann und auf statistische Methoden, wie die Kreuzkorrelation, zurückgreifen muss. Die höchste Partikelkonzentration wird bei der LSV verwendet. Hierbei kann man keine einzelnen Partikel, sondern nur noch Partikelmuster erkennen. [Nit06, S. 68ff.][Wes93] Wie in der Einleitung beschrieben, wurde das PIV-Verfahren von Maldonado [MQ15] eingesetzt, um das Strömungsfeld vor einem Absorbercup zu bestimmen.

2.2.4. Density Tagging Velocimetry (DTV)

Die Density Tagging Velocimetry ist im Prinzip eine Variante des Background Oriented Schlieren-Verfahren, das im nächsten Abschnitt beschrieben wird (2.3.1). Das BOS-Verfahren benötigt Dichtegradienten in der Strömung, um durch die Veränderung der Position der Gradienten die Geschwindigkeit bestimmen zu können. Falls keine natürlichen Dichteanomalien in der Strömung vorkommen, ist die Idee dieser Methode, durch laserinduzierte Temperaturänderungen quasi thermische Tracerpartikel, das sind punktuelle Dichtegradienten, zu erzeugen, die dann mit der Strömung geführt werden und zur Geschwindigkeitsbestimmung dienen können,

die wie beim BOS-Verfahren arbeitet. Das Verfahren ist geeignet um einzelne Dichteanomalien zu verfolgen, allerdings nicht um ganze Geschwindigkeitsfelder zu bestimmen, da durch die Temperaturänderung das Strömungsfeld lokal geändert wird. [RHRH⁺11] Eine Anwendung von diesem Verfahren war die Geschwindigkeitsbestimmung von einer Düsenströmung im Labormaßstab.

2.2.5. Molecular Tagging Velocimetry (MTV)

Dieses Verfahren ist dem PIV-Verfahren sehr ähnlich und wird im Folgenden an dem Tagging von Sauerstoffmolekülen beschrieben. Probleme, die nicht-ideale Partikel bei der PIV verursachen können, werden hierbei dadurch umgangen, dass keine Partikel eingesetzt werden, sondern Sauerstoffmoleküle verfolgt werden. Da Sauerstoffmoleküle in der Luft bereits vorhanden sind, ist es bei diesem Verfahren nicht nötig, dem Fluid etwas hinzuzufügen. Dieses Verfahren wurde Relief (Raman excitation plus laser-induced electronic fluorescence) genannt und funktioniert prinzipiell wie folgt:

Zwei pulsierende Laser, die ungefähr eine Phasenverschiebung in einer Frequenz aufweisen, in der Sauerstoffmoleküle vibrieren können, regen Sauerstoffmoleküle in Schnittpunkten bzw. -flächen der beiden Strahlen zur Vibration an. Ein dritter Laser dient dazu, die bereits angeregten - getaggt - Moleküle noch einmal weiter anzuregen, so dass die Moleküle fluoreszieren. Die Fluoreszenz der Moleküle wird über eine UV-empfindliche Kamera aufgenommen und wie beim PIV-Verfahren kann dann über den Vergleich von zwei sequenziellen Aufnahmen ein Geschwindigkeitsfeld bestimmt werden.

Sauerstoffmoleküle können den angeregten Zustand verhältnismäßig lange beibehalten, was aber den Nachteil in sich birgt, dass die Moleküle aufwändiger anzuregen sind und hierzu drei Laser benötigt werden. Allerdings können so die Punkte von Interesse ziemlich exakt beobachtet werden, da nur in Schnittpunkten der Laser eine Anregung stattfindet. [MCC⁺87, MCM⁺89, MZZ⁺93] Dieses Verfahren wurden bspw. von Miles et al. [MZZ⁺93] benutzt, um die Strömung eines Freistrahles in einem zylinderförmigen Volumen von 15 cm Durchmesser und einer Höhe von ca. 70 cm zu visualisieren.

2.3. Nutzung unterschiedlicher Brechungsindizes

2.3.1. Background Oriented Schlieren (BOS)

In diesem Verfahren wird die Strahlablenkung durch die Änderung des Brechungsindex gemessen. Hierzu wird ein Hintergrund in der einfachsten Form mit und ohne Strahlablenkung fotografiert. Abbildung 2.6 zeigt einen BOS-Aufbau schematisch. Mit diesem Verfahren lässt sich neben dem Geschwindigkeitsfeld auch ein Dichtefeld berechnen. [RR01, VHS05]

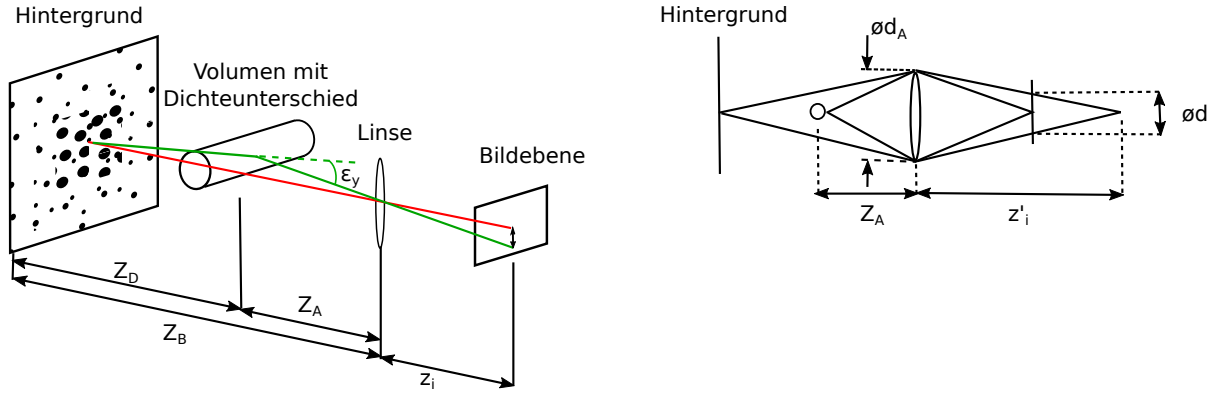


Abbildung 2.6.: Optischer Aufbau des BOS-Verfahrens nach [RR01], links wird eine isometrische Ansicht und rechts die Draufsicht gezeigt. Ein Punktmuster wird auf einer Bildebene abgebildet. Dichtegradienten im Lichtweg verschieben das Punktmuster. Durch den Vergleich mit einer ungestörten Referenzaufnahme kann über die Verschiebung auf die Dichte geschlossen werden.

Nach der Gladstone-Dale Gleichung ist für Gase der Brechungsindex n mit der Dichte ρ verknüpft:

$$n - 1 = \mathcal{K}\rho \quad (2.2)$$

\mathcal{K} ist hierbei die Gladstone-Dale Konstante, die abhängig von dem jeweiligen Gas und der Wellenlänge der Strahlung ist.[VHS05] Eine lokale Dichteänderung führt zu einer Änderung des Brechungsindex und über das Brechungsgesetz von Snellius zu einer Lichtablenkung. Beim BOS-Verfahren im Labormaßstab wird meist ein zufällig gepunkteter Hintergrund fotografiert und über Korrelationsalgorithmen dann die Strahlablenkung zwischen dem Referenzbild und dem abgelenkten Bild bestimmt [Mei02].

Für kleine Strahlablenkungen gilt die Näherung $\tan(\epsilon_y) \approx \epsilon_y$, so dass sich die Strahlverschiebung nach Bild 2.6 zu $\Delta y = Z_D M \epsilon_y$ ergibt, wobei $M = z_i / Z_B$ die Vergrößerung durch die Linse beschreibt und Z_D der Abstand zwischen Hintergrund und dem Dichtegradienten ist. Dies kann mit der Fokallänge f der Linse umgeformt werden zu:

$$\Delta y = f \left(\frac{Z_D}{Z_D + Z_A - f} \right) \epsilon_y \quad (2.3)$$

Um die Dichteverteilung zu berechnen, muss man zunächst das Versetzungsfeld über Linienintegration oder durch Lösen der Poisson Gleichung integrieren:[RR01, Raf15][VHS05][GS07]

$$\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} = \mathcal{R} \left(\frac{\partial \Delta x(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial \Delta y(x, y)}{\partial y} \right) \quad (2.4)$$

$$\Delta y = f \left(\frac{Z_D}{Z_D + Z_A - f} \right) \int_{\Delta z} \frac{1}{n_0} \frac{\partial n}{\partial r(x, y)} dz \quad (2.5)$$

Der prinzipielle Verlauf zur Bestimmung des Dichtefeldes ist in Abbildung 2.7 dargestellt [VHS05]. Da beim BOS-Verfahren der Hintergrund und nicht die Schlieren fokussiert wird, weist das BOS-Verfahren größere Fehler als das PIV-Verfahren (2.2.3) auf (2-3% zu 1%).[Raf15]

Von dem ursprünglichen BOS-Verfahren existieren nach [Raf15] einige Varianten. So kann bspw. ein natürlicher Hintergrund verwendet werden. Die Genauigkeit des Verfahrens lässt sich weiterhin durch die Verwendung von einem farbigen Punktmuster erhöhen (Colored BOS) [GGLS05][Leo07]. [RRM00][RHS⁺14]

Das BOS-Verfahren zeichnet sich vor allem durch seine Einfachheit aus. So ist im Falle der Benutzung eines natürlichen Hintergrundes lediglich eine Kamera und eine Auswerteeinheit notwendig. Darüber hinaus ist dieses Verfahren nicht auf den Labormaßstab beschränkt. So bestimmten Bauknecht et al. [BEW⁺15] die Wirbel an einem Helikopterrotor, wobei als natürlicher Hintergrund ein Tagebau benutzt wurde.

2.3.2. Laser-Speckle-Density Photometry (LSDP)

Dieses Verfahren wurde von Debrus et al. [DFG⁺72] und Köpf [Köp72] im Jahre 1972 erstmals vorgestellt. Das Verfahren ist dem BOS-Verfahren sehr ähnlich. Abbildung 2.8 zeigt den Aufbau der LSDP. Ein Laserstrahl wird aufgeweitet, durch ein Messfeld geführt und danach auf einer Mattglasscheibe fokussiert, die eine Kamera mit einem um L verschobenen Fokus fotografiert. Dadurch, dass nicht die Mattglasscheibe, sondern eine versetzte Ebene fokussiert wird, weiten sich die Strahlen wieder aus und bilden ein Fleckenmuster, das abhängig von dem Austrittswinkel aus der Messstrecke ist. Durch den Vergleich einer ungestörten Referenzaufnahme und der eigentlichen Messaufnahme mittels PIV- oder BOS-Algorithmen lassen sich die Ablenkungen bestimmen und über die Gladstone-Dale Beziehung (Gl. 2.2) kann dann das Dichtefeld berechnet werden. [Eck97, S. 195ff.][GGLS05] Köpf demonstrierte das Verfahren, indem er hiermit das Dichtefeld einer Kerzenflamme darstellte.

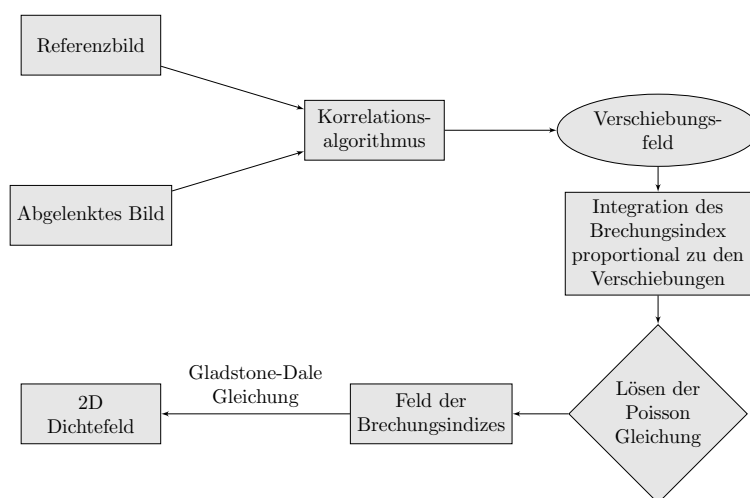


Abbildung 2.7.: Flowchart des BOS-Verfahrens zur Bestimmung des Dichtefeldes (nach [VHS05])

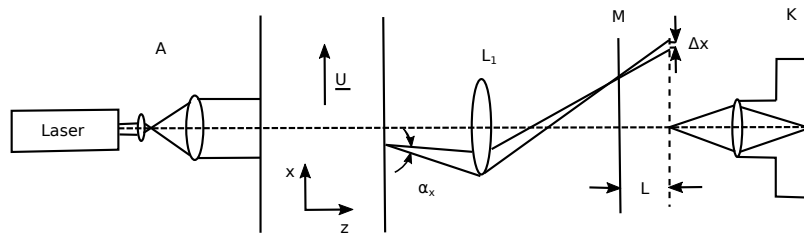


Abbildung 2.8.: Aufbau der Laser-Speckle-Photographie nach [Eck97, S. 196]. Durch Dichtegradienten abgelenkte Lichtstrahlen werden auf einer Mattglasscheibe (M) abgebildet, die mit einer Kamera (K), deren Fokus um L von der Mattglasscheibe versetzt ist, aufgenommen werden. Der Vergleich des aufgenommenen Fleckenmusters mit einer Referenzaufnahme kann zur Bestimmung eines Dichtefeldes benutzt werden.

2.3.3. Schlieren Particle Image Velocimetry (Schlieren PIV)

Dieses Verfahren folgt natürlich vorkommenden Wirbeln in turbulenten Strömungen und bestimmt aus dieser Bewegung eine Geschwindigkeit. Der Versuchsaufbau ist an klassische Schlierenversuche angelehnt und in Bild 2.9 gezeigt. Ein Lichtbündel wird durch eine Messstrecke geführt und vor einer Kamera fokussiert. Der Fokuspunkt ist von einer sog. Schlierenkante teilweise begrenzt. Ein Teil der durch die Wirbel abgelenkten Strahlen trifft auf die Schlierenkante und wird so auf dem Kamerabild als dunklerer Bereich dargestellt. Korreliert man zwei sequentielle Bilder, lässt sich gemäß dem PIV-Verfahren eine Geschwindigkeit bestimmen. Dieses Verfahren funktioniert nur in Strömungen, in denen Wirbel auftreten, und ist folglich nicht auf laminare Strömungen anwendbar. Hargather et al. zeigten die Anwendbarkeit des Verfahrens, indem sie das Geschwindigkeitsprofil einer turbulenten Grenzschichtströmung aufzeichneten[HLSW11].

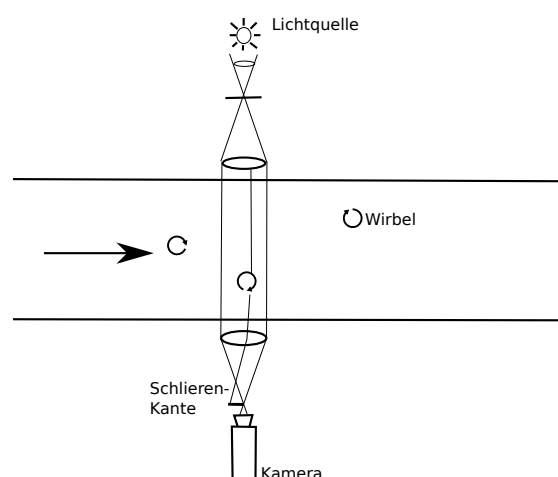


Abbildung 2.9.: Aufbau des Schlieren PIV nach [HLSW11]. Licht wird durch die Messstrecke geführt, fokussiert und im Fokus durch eine Schlierenkante begrenzt und mit einer Kamera detektiert. Wirbel können das Licht derart brechen, dass es auf die Schlierenkante trifft und nicht mehr detektiert, also als Schattenbereich auf dem Kamerabild gezeigt wird.

2.3.4. Schattenverfahren

Das Schattenverfahren ist den Schlierenmethoden sehr ähnlich. Um eine Schattenabbildung zu erzeugen, benötigt man eine punktförmige Lichtquelle, einen Schirm und eine Kamera. Dichteinhomogenitäten erzeugen durch Lichtbrechung Intensitätsunterschiede, die proportional zur zweiten Ableitung der Dichte sind. Die Intensitätsunterschiede können auf dem Schirm als Schatten wahrgenommen werden. Die Schlierenverfahren sind sensibler als die Schattenverfahren, da die Strahlablenkung proportional zur ersten Ableitung der Dichte ist, wohingegen die Intensitätsunterschiede zur zweiten Ableitung proportional sind. [BL92][Eck97, S. 203ff.]

2.3.5. Interferometrie

Das Interferometer vergleicht prinzipiell zwei Strahlen, von denen einer durch die Messstrecke beeinflusst wird. Dabei nutzt die Interferometrie nicht direkt die Strahlablenkung durch unterschiedliche Brechungsindizes, sondern die unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Lichts, die über den Brechungsindex n als das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 zum Medium c_M definiert ist: $n = c_0/c_M$. Der typische Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers ist in Abbildung 2.10 gezeigt. Ein Laserstrahl wird in zwei Teilstrahlen geteilt. Der eine Strahl wird durch die Messstrecke geführt und der andere über eine Referenzstrecke, in der Einbauten in der Messstrecke, wie z.B. Fenster, durch Kompensatorplatten nachgebildet werden. Nach der Messstrecke werden die Strahlen wieder zusammengeführt und auf eine Mattglasscheibe gelenkt, wobei die beiden Strahlen ein Interferenzmuster bilden. Die Interferometrie ermöglicht somit die Messung des integrierten Dichteunterschieds entlang einer Linie.[Eck97, S. 211ff.][Nit06, S. 171ff.] Da Silva [DSBJC⁺95] nutzte bspw. ein Interferometer um Plasmaeigenschaften zu bestimmen.

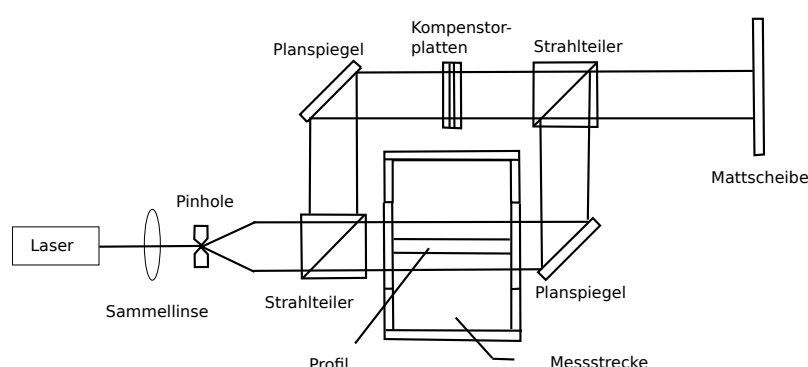


Abbildung 2.10.: Aufbau des Mach-Zehnder-Interferometers nach [Nit06]. Ein Laserstrahl wird geteilt, ein Teilstrahl wird durch eine Messstrecke geführt, der andere durch eine Referenzstrecke. Nach dem Zusammenführen der beiden Teilstrahlen bildet sich ein Interferenzmuster, das auf einer Mattglasscheibe abgebildet wird.

2.4. Infrarot-Thermographie

Jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt sendet elektromagnetische Strahlung aus. Dabei wird der Wellenlängenbereich von $0,7 \mu m$ bis $1000 \mu m$ als infrarot bezeichnet, da Strahlung mit einer Wellenlänge um $0,7 \mu m$ von den Menschen als rot wahrgenommen wird. Bei der Infrarot-Thermographie wird diese Strahlung über einen gewissen Zeitraum integriert und anschließend analysiert. [Nit06, S. 143 ff.]

Da die Infrarot-Thermographie die Grundlage für die in dieser Arbeit vorgestellten Methode ist, soll hier etwas ausführlicher auf die Theorie eingegangen werden. Dabei wird im ersten Teil die Strahlung von Festkörpern unter Vernachlässigung umgebender Gase betrachtet und im zweiten Teil beteiligen sich Gase am Strahlungsaustausch.

2.4.1. Festkörperstrahlung

Ein schwarzer Körper, das ist ein idealer Körper, der sämtliche einfallende Strahlung absorbiert, emittiert Strahlung mit einer charakteristischen Verteilung, die über das Planck'sche Gesetz bestimmt werden kann:

$$M_{\lambda}^s(\lambda, T) = \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc_0}{k\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (2.6)$$

M_{λ}^s ist die spektrale, flächenspezifische Ausstrahlung [$W \cdot m^{-2} \cdot m^{-1}$], c bezeichnet die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum [m/s], k die Boltzmann-Konstante ($k = 1,380649 \cdot 10^{-23} Nm/K$), die Wellenlänge wird mit λ abgekürzt [m] und T stellt die absolute Temperatur [K] dar. Integriert man das Planck'sche Gesetz (Gl. 2.6) über alle Wellenlängen, ergibt sich das Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$M^s = \int_{\lambda=0}^{\infty} M_{\lambda}^s(\lambda, T) d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad (2.7)$$

M^s bezeichnet die flächenspezifische Ausstrahlung [$W \cdot m^{-2}$] und σ die Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c_0 h^3} \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$.

Die Wellenlänge, bei der nach dem Planck'schen Gesetz die größte Energiemenge ausgestrahlt wird, lässt sich über das Wien'sche Verschiebungsgesetz berechnen:

$$\lambda_{max} = \frac{2897,8 \mu m \cdot K}{T} \quad (2.8)$$

Anhand der Strahlungsverteilung nach dem Planck'schen Gesetz (Abb. 2.11) erkennt man bereits, dass Körper mit höheren Temperaturen mehr Strahlung emittieren als Körper mit geringeren Temperaturen. Für qualitative Betrachtungen reicht diese Information prinzipiell schon aus, da Bereiche höherer Temperatur auf Infrarotbildern heller dargestellt werden.

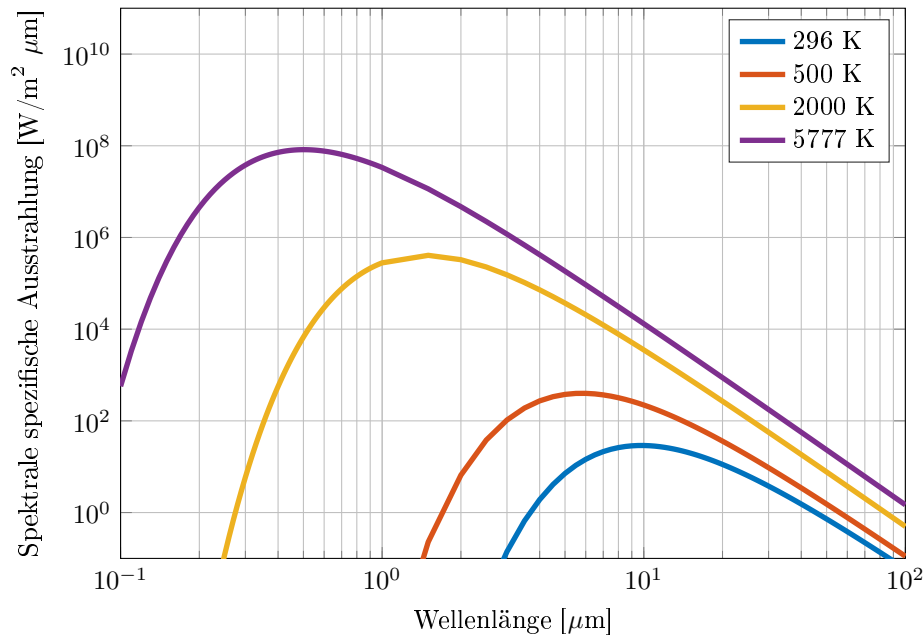


Abbildung 2.11.: Verteilung der spektralen Ausstrahlung eines Schwarzkörpers für verschiedene Temperaturen nach dem Planck'schen Gesetz in logarithmischer Darstellung

Anhand der detektierten Strahlungsintensität lässt sich allerdings auch eine quantitative Aussage über die Temperatur des entsprechenden Körpers treffen. Werden dabei reale Körper betrachtet, also nicht schwarze Körper, müssen weitere Effekte berücksichtigt werden:

Reale Körper absorbieren nicht die gesamte einfallende Strahlung. Ein Teil der Strahlung wird auch reflektiert und transmittiert. Nach dem Kirchhoff'schen Gesetz ist die spektrale Emission gleich der spektralen Absorption. Da ein schwarzer Körper einen Emissionsgrad von 1 aufweist, geben das Planck'sche und das Stefan-Boltzmann-Gesetz für reale Körper zu hohe Werte wieder und müssen durch den Emissionsgrad korrigiert werden.

Zur Definition des Emissionsgrades soll zunächst die spektrale Strahldichte L_λ eingeführt werden, die den, von einem Oberflächenelement ΔA pro Wellenlängen $\Delta\lambda$ und Raumwinkel $\Delta\Omega$, in den Halbraum ausgestrahlten Energiestrom $\Delta\dot{E}$ beschreibt:

$$L_\lambda = \frac{\Delta^3 \dot{E}}{\cos \theta \Delta A \Delta \Omega \Delta \lambda} \quad (2.9)$$

Der Raumwinkel $\Delta\Omega$ setzt sich hierbei aus dem Polarwinkel θ und dem Azimutwinkel φ zusammen (vgl. Abb. 2.12): $\Delta\Omega = \sin \theta \Delta\theta \Delta\varphi$

Der Emissionsgrad ist nun das Verhältnis der spektralen Strahldichte eines realen Körpers zu der eines schwarzen Körpers (Gl. 2.10). Grundsätzlich ist der Emissionsgrad abhängig von der Wellenlänge, der Temperatur und der Strahlungsrichtung.

$$\epsilon'_\lambda(\lambda, T, \theta, \phi) := \frac{L_\lambda(\lambda, T, \theta, \varphi)}{L_\lambda^s(\lambda, T)} = 0 \leq \epsilon'_\lambda \leq 1 \quad (2.10)$$

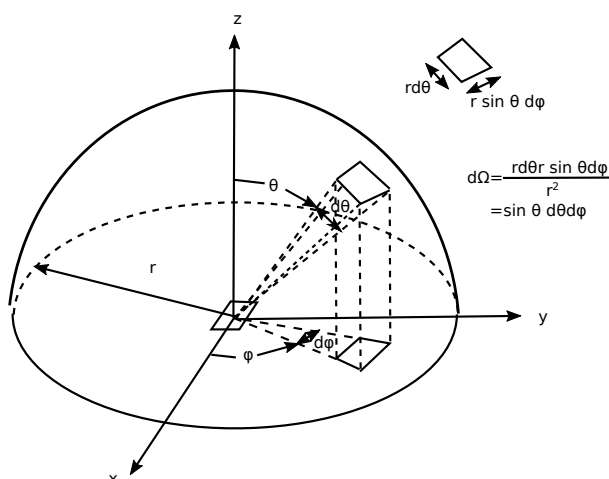


Abbildung 2.12.: Strahlung eines Flächenelements und Raumwinkeldefinition nach[HSM11, S. 10]

Bei Kenntnis des Emissionsgrades und des Anteils der reflektierten Strahlung lässt sich über die Strahlungsintensität die Temperatur eines realen Körpers berechnen. Andernfalls können weitere Annahmen getroffen werden, um die Temperatur näherungsweise zu bestimmen. Bei diffusen Strahlern entfällt die Richtungsabhängigkeit. Ein grauer Strahler weist einen konstanten Emissionsgrad über alle Wellenlängen auf. Wenn man bei einem grauen Strahler von einem temperaturkonstanten Emissionsgrad und konstanten Reflexionen und Transmissionen ausgeht, kann man nach einer Kalibration über die Strahlungsintensität die Temperatur bestimmen. [VDI13, S. 1083 ff.][HSM11, S. 4 ff.]

Dadurch, dass Oberflächen mit verschiedenen Temperaturen unterschiedlich viel Strahlung emittieren, lassen sich z.B. Gasströmungen an Wänden visualisieren, sofern sie die Wandtemperatur ändern. Inagaki und Okamoto [IO97] nutzen beispielsweise dieses Verfahren um Leckagen an Rohrleitungen aufzufinden und Fan et al.[FSY05] untersuchten auf diese Weise Undichtigkeiten an Pipelines.

2.4.2. Gasstrahlung

Neben festen Oberflächen und Flüssigkeiten emittieren auch Gase elektromagnetische Strahlung, die prinzipiell die Visualisierung der Strömung ermöglichen kann. Die Strahlung wird hierbei durch Elektronenübergänge zwischen verschiedenen Energieniveaus oder durch Änderungen des Schwingungs- bzw. Rotationszustandes von Molekülen verursacht. Im Folgenden werden der Einfachheit halber alle drei Effekte als Änderung des Energieniveaus bezeichnet. Photonen können durch Absorption die Erhöhungen des Energieniveaus bewirken und der Wechsel zu einem niedrigeren Energieniveau kann Photonen aussenden, deren Energie genau der Differenz der beiden Energieniveaus entspricht $e_j - e_i = h\nu$ (vgl. Abb. 2.13), wobei die Photonenenergie das Produkt aus dem Planck'schen Wirkungsquantum h und der Frequenz ν ist. [HSM11, S. 441 ff.]

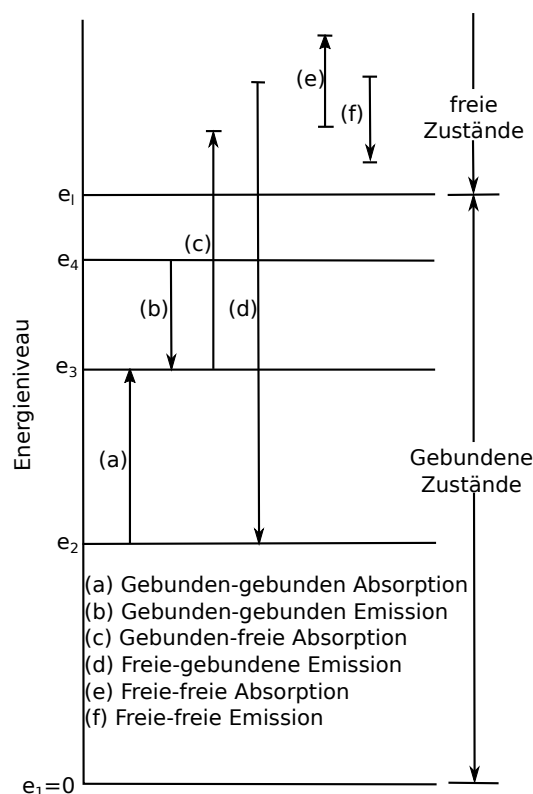


Abbildung 2.13.: Schematische Darstellung der Energieniveaus nach [HSM11, S. 446]. Die Energieniveaus können zwischen verschiedenen, diskreten gebundenen Zuständen oder kontinuierlichen, freien Zuständen wechseln.

Die möglichen Energieniveaus sind von dem molekularen Aufbau der Gase abhängig. So lässt sich beispielsweise mit der Spektroskopie auf die Gaszusammensetzung schließen, indem man analysiert, welcher Teil der Strahlung absorbiert wird. Da die Strahlung durch Wechsel der Energieniveaus in einzelnen Molekülen hervorgerufen wird, ist die Strahlungsintensität von der Anzahl der Moleküle und somit von der Dichte abhängig. Aus diesem Grund ist die Strahlung von Gasen im Vergleich zu Festkörpern entsprechend geringer. [VDI13, S. 1115 ff.]

Die Änderung der diskreten Energiezustände führt zu Spektrallinien bzw. zu Photonen, die genau bei einer charakteristischen Wellenlänge absorbiert oder emittiert werden. Allerdings sorgen verschiedene Effekte dafür, dass Photonen nicht nur in diskreten Linien, sondern in einem gewissen Bereich um diese, absorbiert und emittiert werden. Diese Effekte sorgen dafür, dass die spektralen Eigenschaften von Gasen stark von der Wellenlänge der Strahlung und der Gastemperatur abhängen. [VDI13, S. 1115 ff.][HSM11, S. 441 ff.]

Strahlung, die durch ein Gasvolumen dringt, wechselwirkt auf verschiedene Arten mit dem Gas. Zum einen kann die Strahlung durch Emission, wie oben beschrieben, verstärkt werden. Zum anderen kann die Strahlung auch durch Streuung und Absorption abgeschwächt werden. In diesem Fall gilt das Gesetz von Bouguer:

$$I_{\lambda}(S) = I_{\lambda}(0) \exp \left[- \int_0^S \beta_{\lambda}(S^*) dS^* \right] \quad (2.11)$$

$I_\lambda(S)$ ist die spektrale Intensität an Stelle S und β_λ ist der spektrale Extinktionskoeffizient, der sich aus der Summe des Absorptionskoeffizienten κ_λ und des Streukoeffizienten $\sigma_{s,\lambda}$ zusammensetzt.

Streuung kann auch bewirken, dass Strahlung aus anderen Raumrichtungen in Richtung der betrachteten Strahlung gestreut wird und diese dadurch verstärkt. Maßgeblich hierfür ist die Phasenfunktion $\Phi_\lambda(\Omega_i, \Omega)$, die beschreibt, welcher Anteil der Strahlung aus Richtung Ω_i in Richtung Ω gestreut wird. Die Strahlungstransportgleichung (Gl. 2.12) berücksichtigt diese Effekte:

Änderung der Strahlungsenergie = +Zugewinn durch Emission -Verlust durch Absorption
 -Verlust durch Ausstreuung+Gewinn durch Einstreuung

$$I_\lambda(S + dS, \Omega, t + dt) = \kappa_\lambda I_{\lambda b}(S, t) dS - \kappa_\lambda I_\lambda(S, \Omega, t) dS - \sigma_{s,\lambda}(S, \Omega, t) dS \\ + \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_i=4\pi} \sigma_{s,\lambda} I_\lambda(S, \Omega_i, t) \Phi_\lambda(\Omega_i, \Omega) d\Omega_i dS \quad (2.12)$$

Der Absorptionsgrad und somit auch der Emissionsgrad sind von der Wellenlänge λ , der Temperatur T , dem Druck p , und der optischen Weglänge s abhängig. Sofern man die Streufunktion berechnen oder Streuung ganz vernachlässigen kann, lässt sich aus der Messung und der Kenntnis des Gases sowie von zwei der drei Größen Druck, Temperatur und der optischen Weglänge durch das Medium die jeweils dritte Größe berechnen oder z.B. für Kohlenstoffdioxid anhand von Diagramm 2.14 bestimmen. [VDI13, S. 1115 ff.] [HSM11, S. 31 ff.]

Als Beispiel für die Umsetzung dieser Methodik sei die Bestimmung einer Flammentemperatur genannt [RFK73] [UNY85] [JMjH96]. Allerdings sind hierzu einige Annahmen bzw. Modelle nötig. Char [JMjH96] benutzte z.B. die Schmidt'sche Theorie, um die schichtweise Zusammensetzung in einer Flamme zu erhalten und ein Breitbandmodell zur Bestimmung der Emittivität der Gasflamme. Über ein iteratives Verfahren konnte so die Temperatur aus der Strahlungsintensität berechnet werden.

Aufgrund der genannten Schwierigkeiten ist die IR-Thermographie von Gasen besser für qualitative Analysen wie z.B. die Visualisierung geeignet. Hierfür muss der Fluidstrom entweder selbst vom Hintergrund verschiedene Strahlung emittieren oder einen Teil der Strahlung vom Hintergrund absorbieren. In jedem Fall muss das Fluid infrarot aktiv sein, d.h. dass das Fluid mindestens in einem Teil des Infrarotbereichs mit der Strahlung wechselwirkt. Dies tun vor allem dreiatomige Moleküle wie CO_2 und H_2O [VDI13, S. 1115 ff.]. Symmetrische zweiatomige Gase wie N_2 , O_2 und H_2 sind dagegen im Infrarotbereich nicht aktiv und strahlen nur unwesentliche Beträge ab [HSM11, 452 ff.]. Sofern infrarot aktive Gase vorhanden sind, ist die Infrarot-Thermographie ein einfaches Verfahren zur Visualisierung der Strömung. So lassen

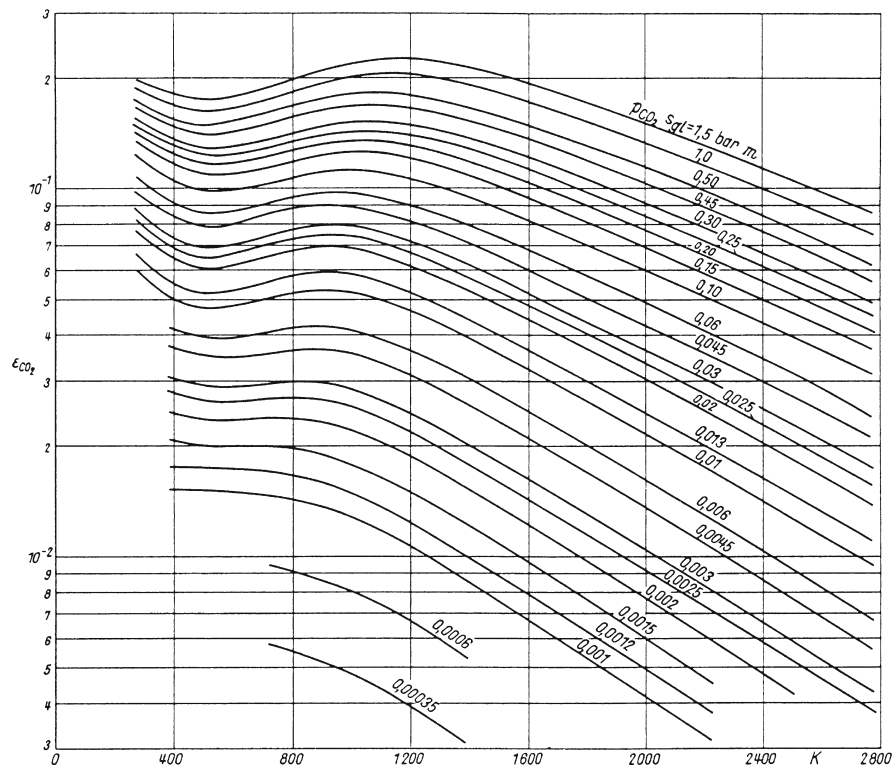


Abbildung 2.14.: Emissionsgrad von Kohlenstoffdioxid bei 1 bar Druck in Abhängigkeit der Temperatur und des Produkts von CO_2 Partialdruck und der Emissionslänge [VDI13, S. 1121]

sich z.B. die Abgase von Triebwerken [GJ92] oder auch Undichtigkeiten auf Deponien [LYS03] zeigen.

2.5. Beurteilung bzgl. der Anwendung auf Solartürme

Da das Ziel dieser Arbeit hauptsächlich darin besteht, die Strömung aus dem Receiver des STJ zu visualisieren und ein Geschwindigkeitsfeld zu berechnen, soll jetzt die Anwendbarkeit der bisher vorgestellten Verfahren auf einen Solarturm diskutiert werden:

Prinzipiell sind alle Verfahren ungeeignet, die nur punktuell Geschwindigkeiten messen, weil viele Punktmessungen für eine Feldmessung erforderlich wären und somit ein extrem hoher Aufwand entsteht. Darüber hinaus sind Verfahren, die Objekte in die Strömung einbringen müssen, der konzentrierten Solarstrahlung ausgesetzt und verschatten damit im besten Fall nur unerwünschterweise den Receiver und werden im schlimmsten Fall durch die Strahlung zerstört. Damit scheiden Drucksonden, Hitzdrahtanometer, Pulsdrahtanometer, LDA, LFA und Interferometrie aus.

Da die Rückführluft bei einem offenen volumetrischen Receiver im Lichtweg zum Receiver ausgeblasen wird, sollte das Messverfahren keine Partikel benötigen. Die eingesetzten Partikel weisen normalerweise einen hohen Reflektionsgrad auf und führen so zu hohen optischen Verlusten, wenn sie sich auf dem Receiver, der einen möglichst hohen Absorptionsgrad haben

sollte, absetzen. Partikel mit höheren Absorptionsgraden sind auch keine Lösung, da sie sich durch die konzentrierte Strahlung erwärmen und aus diesem Grund das Strömungsfeld durch natürliche Konvektion beeinflussen. Deshalb sind PIV, PTV und LSV nicht praktikabel. Ein weiterer Grund hierfür ist auch, dass die Laserleistung beschränkt ist und sich diese Verfahren deshalb nicht beliebig auf größere Dimensionen übertragen lassen. Deshalb scheidet auch das MTV-Verfahren aus.

Die Rückführluft hat nur geringe Anteile strahlungsaktiver Komponenten (ca. 400 vppm CO_2 [ESR15] und durch die Temperaturerhöhung der Umgebungsluft weist die Rückführluft nur eine geringe Luftfeuchtigkeit auf). Aus diesem Grund ist auch die klassische Thermographie ungeeignet, da die Signale kaum vom Hintergrundrauschen zu unterscheiden sind.

LSDP, Schattenverfahren, Schlieren PIV und BOS können prinzipiell auf einen Solarturm angewandt werden, allerdings benötigen diese Verfahren auf der fortgeführten Linie zwischen Kamera und Dichteanomalie einen Schirm oder Ähnliches. Die Position der Anomalie ist in Höhe des Receivers, die beim Solarturm Jülich etwa 60 Meter beträgt. Möchte man als Schirm oder Hintergrund den Boden benutzen, z.B. beim BOS-Verfahren mit natürlichem Hintergrund, muss die Kamera deutlich über dem Solarturm positioniert werden. Dies ist prinzipiell möglich, allerdings aufwändig. Die grundsätzliche Umsetzbarkeit einer solchen Messung haben Raffel et al. [RHS⁺14] 2014 bewiesen. Hier wurde die Rotorumströmung eines Helikopters während eines Flugs untersucht, wobei die Kamera in einem mitfliegenden Flugzeug positioniert war. Ein Bild des „Versuchsaufbaus“ ist in Abb. 2.15 gegeben.

Die Ergebnisse der Diskussion sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Generell gibt es Verfahren, die auch beim Solarturm anwendbar sind, aber keines der Verfahren ist unter diesen Bedingungen einfach umzusetzen, was die Entwicklung eines neuen bzw. modifizierten einfacheren Verfahrens bewirkt hat, das im folgenden Kapitel vorgestellt wird. Den Übergang zum nächsten Kapitel soll ein Exkurs zu Infrarotkameras geben, da diese Kamera grundlegend für das Verfahren ist.



Abbildung 2.15.: Messung der Wirbel an einem Helikopterrotor mittels BOS. Links der „Versuchsaufbau“. Der Helikopter wird von oben aus einem Flugzeug betrachtet. Rechts ist die Visualisierung dargestellt. Neben den Dichtegradienten am Rotor ist auch das Abgas deutlich sichtbar. [RHS⁺14]

Tabelle 2.1.: Übersicht über die Eignung verschiedener Messtechniken auf die Visualisierung bzw. die Geschwindigkeitsfeldbestimmung der Rückföhlruft eines Solarturms

Betrachtete Eigenschaft	Eignung	Begründung
Geschwindigkeit		
Drucksonden (2.1)	ungeeignet	Punktmessung
Hitzdrahtanometer(2.1)	ungeeignet	Punktmessung
Pulsdrahtanometer(2.1)	ungeeignet	Punktmessung
Tracer		
LDA(2.2.1)	ungeeignet	Punktmessung
LFA(2.2.2)	ungeeignet	Punktmessung
PIV, PTV, LSV(2.2.3)	ungeeignet	Partikeleinbringung
DTV(2.2.4)	ungeeignet	Punktmessung
MTV(2.2.5)	ungeeignet	zu hohe Laserleistung
Brechungsindex		
BOS(2.3.1)	aufwändig	erhöhte Kameraposition
LSDP(2.3.2)	aufwändig	erhöhte Kameraposition
Schlieren PIV(2.3.3)	aufwändig	erhöhte Kameraposition
Schattenverfahren(2.3.4)	aufwändig	erhöhte Kameraposition
Interferometrie(2.3.5)	ungeeignet	Punktmessung
Infrarotstrahlung		
IR-Thermographie(2.4)	ungeeignet	Luft ist kaum IR-aktiv

2.6. Exkurs zu Infrarotkameras

Eine Infrarotkamera oder auch Wärmebildkamera detektiert Strahlungsintensitäten, die dann mittels Kalibrierkurven in Temperaturen umgerechnet werden können. Es gibt im Wesentlichen zwei Arten von Detektortypen, nämlich thermische Detektoren und Quantendetektoren. Thermische Detektoren wandeln die Strahlungsenergie in Wärme um und messen dann Eigenschaftsänderungen durch die Temperaturerhöhung, z.B. eine erhöhte Leitfähigkeit. Thermische Detektoren sind verhältnismäßig träge und konkurrieren daher nur im langwelligen Bereich mit Quantendetektoren. Dieser Exkurs geht vor allem auf Quantendetektoren ein, da diese auch bei den hier durchgeführten Messungen verwendet wurden. Quantendetektoren funktionieren ähnlich wie Photovoltaik Elemente und wandeln Photonen direkt in einen Messstrom oder eine Messspannung um. Dabei ist zu beachten, dass nur Photonen umgewandelt werden können, deren Energie größer als die Bandlücke des Detektormaterials ist. Quantendetektoren für den MWIR-Bereich müssen auf unter 140 K und für den LWIR-Bereich auf unter 80 K gekühlt werden. Dies erfolgt in der Regel mit flüssigem Stickstoff oder einem Sterli ngkühler, so dass die thermische Strahlung innerhalb des Kameragehäuses vernachlässigt werden kann [Bau07]. Das am häufigsten verwendete Detektormaterial ist Indium-Antimon (InSb), das Strahlung im Bereich von 1 - 5 μm verwerten kann. Der Sensor, das sog. Focal Plane Array (FPA) besteht aus vielen Einzeldetektorelementen. Diese erzeugen nach der Fertigung unterschiedliche Signale, die durch die Nichtuniformitäts-Korrektur (engl. Non Uniformity Correction NUC) vereinheitlicht werden. Hierbei wird in der Regel (2-Punkt-NUC) ein schwarzer oder grauer

Körper bei zwei unterschiedlichen Temperaturen betrachtet und das Antwortverhalten der Detektorelemente linear angepasst. Da das Antwortverhalten nicht perfekt linear ist, bleibt nach dem NUC noch ein Rauschen mit fixen Muster (engl. fixed pattern noise). Defekte Detektorelemente werden durch die sog. Bad Pixel Correction eliminiert, indem die gemessenen Werte durch gewichtete Mittelwerte der Nachbapixel ersetzt werden. Abbildung 2.16 zeigt die Umwandlung der Strahlung in ein Digitallevel (DL) oder mittels Kalibrierung in eine Temperatur. Die Strahlung wird mit einer Linse auf das FPA fokussiert, wobei die Strahlung optional einen Filter durchlaufen kann. Die Sensorsignale werden durch die Nichtuniformitäts-Korrektur bereinigt und können an dieser Stelle als Digitallevel ausgegeben werden. Sofern das Medium zwischen der Szene und Kamera keinen Einfluss auf die Strahlung hat, kann mit Informationen über den Filter und die Kamertemperatur und einer vorher durchgeführten Kalibrierung auf die Temperatur des Objekts geschlossen werden. [Abu11, S. 38 ff.], [VM10, S. 73 ff.]

Eine wichtige Einstellung bei der Infrarotkamera ist die Integrationszeit, die bestimmt über welchen Zeitraum die einfallende Strahlung integriert wird. Die zu wählende Integrationszeit ist abhängig von den erwarteten Temperaturen bzw. der eingestrahnten Energie. In Kombination mit der Zeit, die für die Auswertung der Detektoren benötigt wird, ergibt sich hieraus die maximal Bildaufnahme Frequenz der Kamera. Außerdem ist die Noise Equivalent Temperature Difference (NETD, dt. Temperaturdifferenz, die zum Rauschen äquivalent ist) ein wichtiges Charakterisierungsmerkmal einer Kamera. Zur Bestimmung der NETD wird die Strahlung eines schwarzen Körpers mit homogener Temperatur gemessen und ein gewichteter Mittelwert der maximalen Abweichungen bestimmt. Dieser Wert ist die NETD und ist unter anderem auch von der Temperatur abhängig. [Abu11, S. 38 ff.]

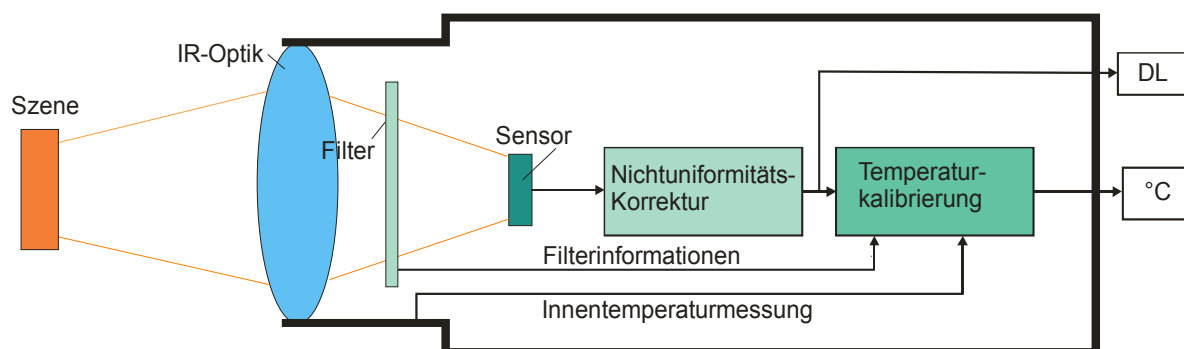


Abbildung 2.16.: Schematische Darstellung einer Infrarotkamera. Strahlung wird über eine Optik durch einen Filter auf den Sensor geleitet. Dort wird die NUC-Korrektur durchgeführt. Diese Daten können als Digitallevel (DL) oder mittels einer Kalibrierung als Temperaturen ausgegeben werden. [Abu11, S. 68]

3. „Induced Infrared Thermography”

Wie das letzte Kapitel ergeben hat, ist derzeit kein Messverfahren zur Visualisierung der Strömung an offenen volumetrischen Receivern ohne erheblichen konstruktiven Aufwand umzusetzen. Im Folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, welches dazu in der Lage ist und hier Induced Infrared Thermography (IIT, dt. Induzierte InfrarotThermographie) genannt wurde. In Abschnitt 3.1 wird die Idee des Verfahrens dargestellt und auf die zeitlichen Ursprünge dieser Methode eingegangen. Da bei der IIT ein Tracergas eingesetzt werden muss, wird im nächsten Abschnitt, 3.2, am Beispiel des STJ gezeigt, wie ein passendes Gas gefunden werden kann. Die Strahlungseigenschaften des Tracergases und der Atmosphäre wurden mit Hilfe der Datenbank HITRAN berechnet, was Gegenstand des Abschnitts 3.3 ist. Abschließend werden in Abschnitt 3.4 die Schwierigkeiten der Temperaturmessung mittels der IIT aufgezeigt und ein Fazit gezogen.

3.1. Verfahrensbeschreibung

Die Grundidee dieses Verfahrens besteht darin, einer Gasströmung, die im Grundzustand nicht oder nur minimal im Infrarotbereich wechselwirkt, eine Komponente hinzuzugeben, die eine starke Wechselwirkung im Infrarotbereich aufweist. Durch das Hinzufügen der weiteren Komponente, dem Tracer, werden die Infraroteigenschaften erst induziert, wovon der Name dieser Methode herrührt. Prinzipiell kann die Absorption und Streuung oder die Emission des Tracers ausgenutzt werden. Im ersten Fall muss Strahlung in einem bestimmten Wellenlängenbereich von Objekten oder der Atmosphäre im Hintergrund des Tracers vorhanden sein, so dass die Intensität der Hintergrundstrahlung durch den Tracer abgeschwächt wird und man mit einer Infrarotkamera eine Art Schattenbild aufnimmt. In diesem Fall muss die Temperatur des Tracers hinreichend klein sein, damit die thermische Emission nicht die Abschwächung der Hintergrundstrahlung aufhebt. In dem zweiten Fall überwiegt die emittierte Strahlung des Tracers die Hintergrundstrahlung, die idealerweise vernachlässigt werden kann. Auf den ersten Fall soll im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden, da die Anwendung auf einen Solarturm zwar prinzipiell möglich ist, aber hierbei sogar ein beheizter Hintergrund erforderlich wäre, was diese Variante noch aufwändiger als bereits bekannte Verfahren macht. In der Anwendung in dieser Arbeit wird die Strömung eines Tracers, der eine höhere Temperatur als die Atmosphäre aufweist, vor einem atmosphärischen Hintergrund gemessen.

Obwohl dieses Verfahren unabhängig am deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt wurde, bestand die Idee zu einem solchen Verfahren schon früher. Gordge und Page [GP93] führten bereits 1993 einen Versuch zur Visualisierung einer Düsenausströmung durch. Hierbei wurde die Düse zunächst mit Luft durchströmt und mittels einer Infrarotkamera ein Referenzbild erzeugt. Danach wurde ein Luft- CO_2 -Gemisch durch die Düse geführt und mit der Infrarotkamera gefilmt. Um die Strömung zu visualisieren, wurde das Referenzbild von

den anderen Aufnahmen subtrahiert. Einen ähnlichen Ansatz verfolgten auch Narayanan et al. [NPSY03]. In ihrem Experiment wurde Schwefelhexafluorid (SF_6) benutzt, um die Luftströmung aus einer Düse vor einem gekühlten Hintergrund zu zeigen. Yoon et al. [[YBR⁺06]] benutzten reines CO_2 , das vor dem Ausströmen aus einer Düse erhitzt wurde, um die Strömung zu visualisieren. Obwohl diese Versuche auf der gleichen Idee beruhen wie die IIT, beschränkten sie sich auf den Labormaßstab. Ein möglicher Grund hierfür liegt darin, dass Narayanan et al. sowie Yoon et al. temperaturregulierte Hintergründe benutzten, die für einen größeren Maßstab ungeeignet sind. Die IIT in der hier beschriebenen Form geht über diese Ansätze hinaus und benutzt die Atmosphäre als Hintergrund. Dies beeinflusst direkt die Auswahl des Tracergases, was im nächsten Abschnitt dargestellt wird. Um die Strömung zu visualisieren, wird ein ähnlicher Ansatz wie bei Gordge und Page benutzt. Die Strahlung des Tracers wird mittels einer Infrarotkamera detektiert. Da die Strahlung in dieser Form noch nicht erkennbar ist, wird ein dynamisches Hintergrundbild erzeugt und von jeder Aufnahme subtrahiert. Diese Methodik ist in Kapitel 4 genauer beschrieben. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal liegt darin, dass sich die IIT nicht auf die Visualisierung beschränkt, sondern mittels eines PIV-Algorithmus Geschwindigkeitsfelder aus den Strömungsbildern erstellt. [TR15]

3.2. Auswahl eines Tracergases

Eine zentrale Frage bei der IIT-Methode ist, welcher Tracer eingesetzt werden soll. Grundsätzlich kommen hierfür alle Stoffe, die bei der entsprechenden Arbeitstemperatur gasförmig vorliegen und Infrarotstrahlung emittieren, in Frage. Bspw. können das Moleküle mit Kohlenstoffdoppel- und -dreifachbindungen, Kohlenstoffdioxid, Ozon, Wasser oder Schwefeldioxid sein [TR15]. Nach Etheridge [Eth96] werden an einen idealen Tracer folgende Anforderungen gestellt:

- kein Bestandteil der betrachteten Umgebung
- einfach und bei geringen Konzentrationen messbar
- nicht gesundheitsgefährdend
- nicht reaktiv, nicht entflammbar und thermisch stabil
- umweltfreundlich
- kostengünstig einsetzbar

Anhand dieser Kriterien lassen sich Stoffe ausschließen bzw. die Auswahl eingrenzen. Signale sind immer dann gut zu erkennen, wenn ein hohes Signal-zu-Rauschen Verhältnis vorliegt, sich also gut von dem zufälligen Hintergrundrauschen unterscheiden. Um das Hintergrundrauschen zu verringern, können Spektralfilter eingesetzt werden, die nur für einen gewissen Wellenlängenbereich, in dem der Tracer Strahlung emittiert, durchlässig sind.

Da bei der IIT die Atmosphäre als Hintergrund benutzt werden soll, ist es zweckmäßig, das Transmissionsspektrum der Erdatmosphäre zur Auswahl zu benutzen. Der Gedanke dabei ist,

dass Störeinflüsse durch Streuung oder Reflektion des Sonnenlichtes minimiert werden können, wenn die Strahlung in einem Fenster detektiert wird, in dem die Atmosphäre einen geringen Transmissionsgrad aufweist. In der Abbildung 3.1 ist das Transmissionsspektrum der Erdatmosphäre gezeigt (berechnet von Steven Lord[Lor92] und bereitgestellt vom Gemini Observatory[Gem15]). Weiterhin ist das Wien'sche Gesetz (s. Gl. 2.8) dargestellt, das für einen Schwarzkörper bei einer gegebenen Temperatur beschreibt, bei welcher Wellenlänge die maximale Emission vorliegt. Ein Gas emittiert dann viel Strahlung, wenn es einen hohen Emissionskoeffizienten im Bereich maximal möglicher Abstrahlung aufweist, der durch die Arbeitstemperatur gegeben ist. Die Temperatur der Warmluft am STJ beträgt zwischen 150°C und 200°C, was nach dem Wien'schen Gesetz zu Wellenlängen zwischen 6 und 8 μm führt. Mögliche Fenster für die Anwendung der IIT liegen im Bereich von 2,6 - 2,8; 4,2 - 4,4; 5,9 - 6,0; 6,4 - 6,7 und 14,3 - 15 μm . Weiterhin muss man beachten, dass nicht über den gesamten Infrarotbereich Kameras verfügbar sind, sondern im Wesentlichen für Langwellen (7 - 14 μm), Mittelwellen (2 - 5 μm) und Kurzwellen (0,9 - 1,7 μm) [VM10, S. 1 ff.], wobei gewisse Abweichungen und Überschneidungen je nach Hersteller auftreten können. Aus diesem Grund wurde für die Anwendung am STJ der Bereich von 4,2 bis 4,4 μm ausgewählt. In diesem Bereich absorbiert CO_2 die Solarstrahlung und wird folglich als Tracer eingesetzt. Es existieren spezielle Filter hierfür, die hauptsächlich diesen Strahlungsbereich transmittieren, so dass sich das Signal-zu-Rauschen Verhältnis durch den Einsatz dieser Filter noch erhöhen lässt [VM10, S. 397 ff.]. CO_2 kann nicht alle Kriterien nach Etheridge erfüllen. Es ist zwar leicht messbar, im betrachteten Temperaturbereich thermisch stabil und nicht reaktiv bzw. entflammbar sowie kostengünstig einsetzbar, allerdings ist es in höheren Konzentrationen gesundheitsgefährdend (ab einer Konzentration von 0,1% löst es Kopfschmerzen aus, Konzentrationen über 8% sind bei längerer Exposition tödlich) und es hat eine klimaschädigende Wirkung. Da das Tracer-gas nur in geringen Konzentrationen eingesetzt wird, lassen sich diese negativen Wirkungen weitestgehend vernachlässigen. CO_2 ist Bestandteil der Atmosphäre in einer Konzentration von etwa 400 ppm [ESR15], so dass die Atmosphäre Strahlung in diesem Bereich abschwächt. Berechnungen dazu erfolgen im nächsten Abschnitt.

3.3. Strahlungseigenschaften und Atmosphäreneinfluss

Im vorherigen Kapitel wurde bereits angedeutet, dass die Strahlung von Gasen stark vom spektralen Bereich abhängt und somit wesentlich komplizierter als die von Festkörpern ist. Ein Vergleich der Strahldichte eines schwarzen Körpers und CO_2 ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Zur Berechnung von Strahlungseigenschaften lassen sich zwar vereinfachte Modelle einsetzen, allerdings können hierdurch nicht alle Phänomene erklärt werden. Zum Beispiel stellt Vollmer [VM10, S. 54] ein niedrig aufgelöstes Transmissionsspektrum der Atmosphäre dar, nach dem bereits nach zehn Metern keine Strahlung des CO_2 sichtbar ist, doch um dies schon ein-

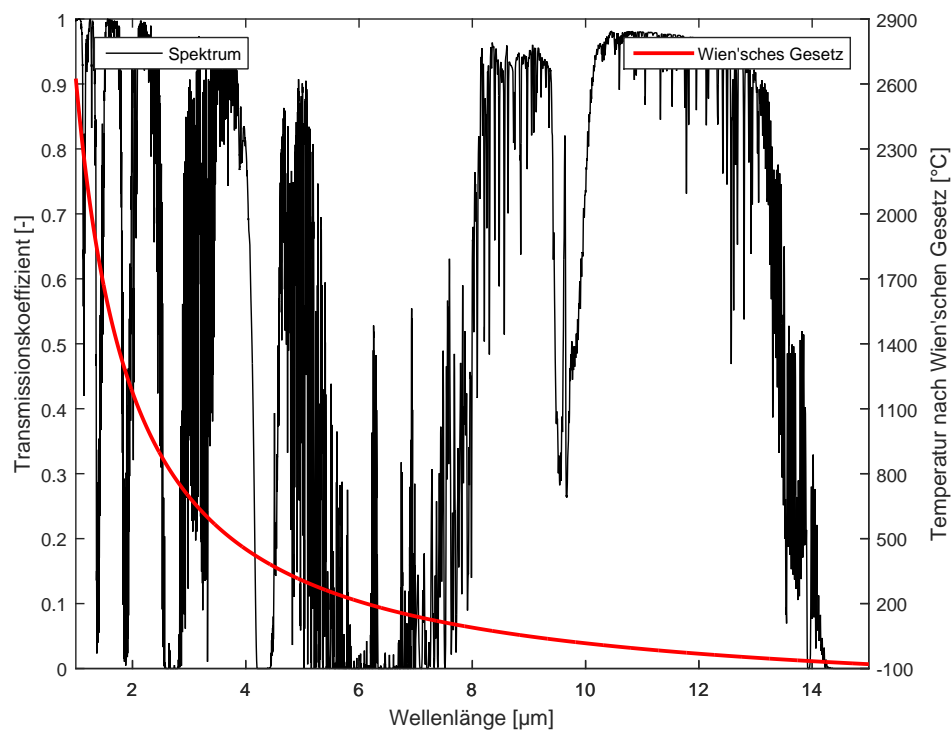


Abbildung 3.1.: Berechnetes Transmissionsspektrum der Erdatmosphäre (für Air Mass: 1,5; 3 μm äquivalente Wassersäule). Zusätzlich ist das Wien'sche Gesetz eingezeichnet. Es sind einige Bereiche mit geringer Transmission zu erkennen, so dass dort Solarstrahlung keinen Einfluss hat.[Lor92, Gem15]

mal vorwegzugreifen, konnte mittels der IIT die Strömung aus über 100 Metern Entfernung visualisiert werden.

Die Berechnungen erfolgen hier mit der Datenbank HITRAN (High Resolution Transition) [RGB⁺13], in der die Übergänge zwischen den einzelnen Energiezuständen von 47 Molekülen aufgelistet ist. Für CO_2 sind in dem Bereich von 2 bis 5 μm bspw. über 127.000 Übergänge erfasst. Weiterhin wird die Python-Bibliothek HAPI (HITRAN Application Programming Interface) [Koc15] verwendet. Diese Datenbank wurde gewählt, weil sie in der Forschung am häufigsten angewendet wird [LZJ12]. Grundlegend zur Berechnung der einzelnen Spektren ist der Absorptionskoeffizient k . Dieser wird als Produkt der in der Datenbank hinterlegten Linienintensität S und einer Formfunktion f mit den Defaulteinstellungen von HAPI berechnet:

$$k(\lambda, T, p) = C \cdot S(T) \cdot f(\lambda, T, p) \quad (3.1)$$

λ bezeichnet hierbei die Wellenlänge, T die absolute Temperatur, p den Druck und C die Konzentration des jeweiligen Moleküls. Die Formfunktion f berücksichtigt, dass die Übergänge nicht an einer diskreten Wellenlänge stattfinden, sondern in einem kontinuierlichen Bereich um diese Wellenlänge. Es wird empfohlen, als Formfunktion das Hartmann-Tran-Profil [NLTH13] zu verwenden. Dieses wurde zwar auch in HAPI implementiert, doch da in der Datenbank bisher noch nicht alle notwendigen Parameter aufgelistet sind, vereinfacht sich das Hartmann-Tran-Profil zum Voigt-Profil, das nur den Dopplereffekt und eine Stoßverbreiterung berücksichtigt. Dies führt generell zu einer systematischen Unterschätzung der Absorption [TBC⁺14]. Im Infrarotbereich sind aber nach Howell [HSM11, S. 441 ff.] eben diese beiden Effekte dominierend, so dass die Benutzung des Voigt-Profiles für diesen Anwendungsfall gerechtfertigt ist und die Unterschätzung vernachlässigt werden kann. Der spektrale Absorptions- α_λ , Emissions- ϵ_λ und Transmissionsgrad τ_λ berechnet sich wie folgt aus dem spektralen Absorptionskoeffizienten k_λ :

$$\alpha_\lambda = 1 - e^{-k_\lambda \cdot l}, \quad \epsilon_\lambda = \alpha_\lambda, \quad \tau_\lambda = e^{-k_\lambda \cdot l} \quad (3.2)$$

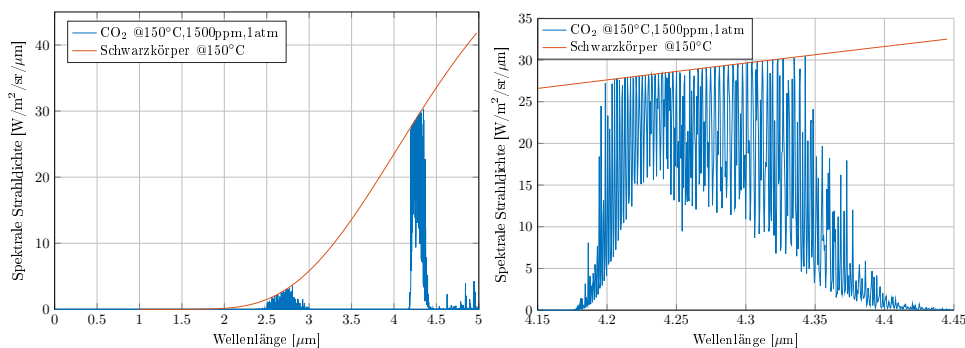


Abbildung 3.2.: Unterschied der spektralen Strahldichte zwischen einem schwarzen Körpers und CO_2 im Kurz- bis Mittelwellen IR-Bereich (links) und detaillierter um die 4,3 μm -Bande. Das Gas emittiert deutlich weniger als der Schwarzkörper und die Emission ist stark von der Wellenlänge abhängig.

Hierbei ist l im Fall des Absorptions- und Transmissionsgrades die optische Weglänge durch das Medium und im Falle des Emissionsgrades die Länge des emittierenden Gases. In diesen Gleichungen wurden einige implizite Annahmen getroffen. In die Berechnung des Transmissionsgrades geht neben dem Absorptionskoeffizienten k auch der Streukoeffizient σ mit ein (vgl. Gl. 2.11). Wird nur der Absorptionskoeffizient benutzt, wurde angenommen, dass die Streuung vernachlässigbar ist. Diese Annahme wird nach Jancsár und Iványi [JI07] häufig im Infrarotbereich getroffen. Eigenabsorption wurde ebenfalls vernachlässigt. Dies wurde verifiziert, indem die emittierte Strahlung über eine Länge von 100 m berechnet und mit dem Ergebnis der Emission unter Berücksichtigung der Eigenabsorption verglichen wurde. Dazu wurde die Länge in zentimetergroße Abschnitte eingeteilt, in denen die emittierte Strahlung addiert und die Eigenabsorption dividiert wurde. Die relative Abweichung lag bei einer CO_2 -Konzentration von 2000 ppm und einer Temperatur von 50°C bei vernachlässigbaren $2 \cdot 10^{-3}\%$.

Aus den Gleichungen 3.1 und 3.2 lässt sich bereits der Einfluss der Konzentration und der Weglänge ableiten. Diese gehen exponentiell in den Transmissionskoeffizienten ein. Der Einfluss des Druckes wird hier vernachlässigt. Die Ausblasung beim STJ findet unter Atmosphärendruck statt, so dass der Druck in den Messungen als konstant angesehen wird. Wie sich die Temperatur auf den Absorptionskoeffizienten auswirkt, lässt sich aus den genannten Formeln nicht direkt bestimmen, wobei nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (s. Gl. 2.7) von einem starken Einfluss auf die emittierte Strahlung auszugehen ist. Für die Linienintensität und Formfunktion existieren gegenläufige Effekte, die je nach Übergangsposition und der Größe des Übergangs zu unterschiedlichen Effekten führen können. So werden einzelne Übergänge durch eine höhere Temperatur vergrößert, während andere verkleinert werden. Wie sich eine Temperaturänderung auf eine einzelne Linie auswirkt, ist an dieser Stelle nicht weiter relevant, da das Strahlungsverhalten in einem breiteren Bereich betrachtet wird und somit die Summe der Linienveränderungen von Interesse ist. Dabei lässt sich sagen, dass die Banden, in denen die Moleküle mit der Strahlung wechselwirken, mit höheren Temperaturen breiter werden, wobei die Absorptionskoeffizienten teilweise gemindert werden. Dies ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Durch die Verbreiterung der Bande wird auch der effektive Emissionsgrad vergrößert, der als Verhältnis der Gasstrahlung zur Schwarzkörperstrahlung in dem Betrachtungsbereich definiert ist:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\int_{2\mu m}^{5\mu m} \epsilon_{\lambda} \cdot \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(\frac{hc_0}{k\lambda T}) - 1]} d\lambda}{\int_{2\mu m}^{5\mu m} 1 \cdot \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(\frac{hc_0}{k\lambda T}) - 1]} d\lambda} \quad (3.3)$$

Die emittierte Strahlung wird auf dem Weg durch die Atmosphäre durch Absorption abgeschwächt. Als Atmosphäre wurde hier feuchte Luft mit einer relativen Luftfeuchte von 50%, einer CO_2 -Konzentration von 400 ppm und einer Temperatur von 23°C gewählt. Für die Emission wurde feuchte Luft mit den angegebenen Anteil an CO_2 und der gegebenen Temperatur benutzt, für die Emissionsbreite wurde ein Meter gewählt. Der Einfluss der Absorption ist in

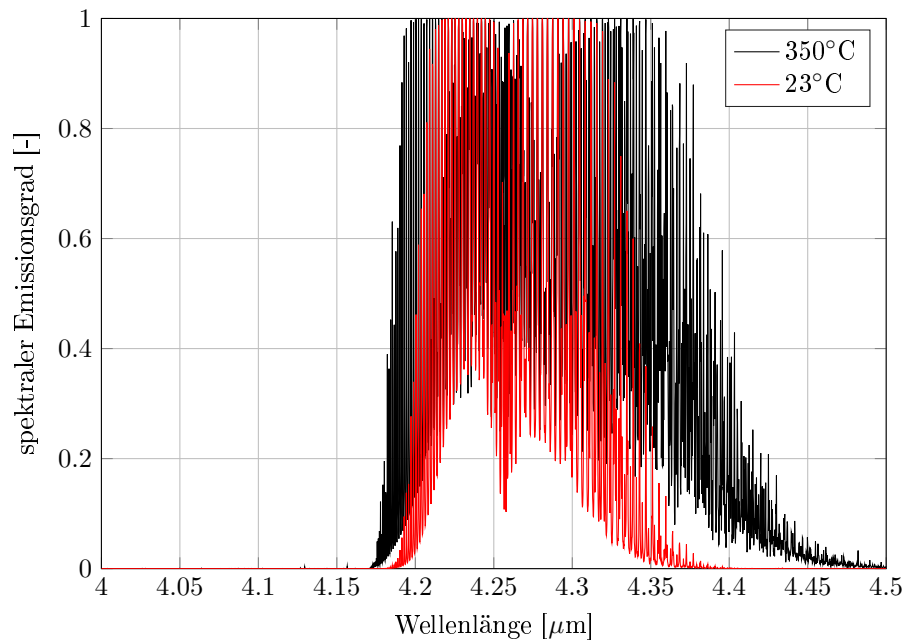


Abbildung 3.3.: Spektraler Emissionsgrad von CO_2 bei unterschiedlichen Temperaturen und einer Konzentration von 1500 ppm. Es ist eine deutliche Verbreiterung des Emissionsbereichs erkennbar, wobei der Emissionsgrad stellenweise bei niedrigeren Temperaturen auch höher sein kann.

Abbildung 3.4 zeigt. Hierbei ist die logarithmische Skala zu beachten. Es ist erkennbar, dass die Temperatur die Emission am stärksten beeinflusst und die Absorption der Atmosphäre die Leistungsdichte deutlich abschwächt. Dadurch, dass eine höhere Temperatur die Bande verbreitert, erhöht sich zum einen der effektive Emissionsgrad, dargestellt in Abbildung 3.5, zum anderen wird die Strahlung weniger stark abgeschwächt, was anhand der normierten Strahldichte in Abbildung 3.6 wiedergegeben ist. Letzteres lässt darauf schließen, dass die Atmosphäre auf der Breite der Bande relativ schnell, nach ca. 20 m, sämtliche Strahlung absorbiert und im Wesentlichen Strahlung, die außerhalb dieser Bande liegt, transmittiert wird.

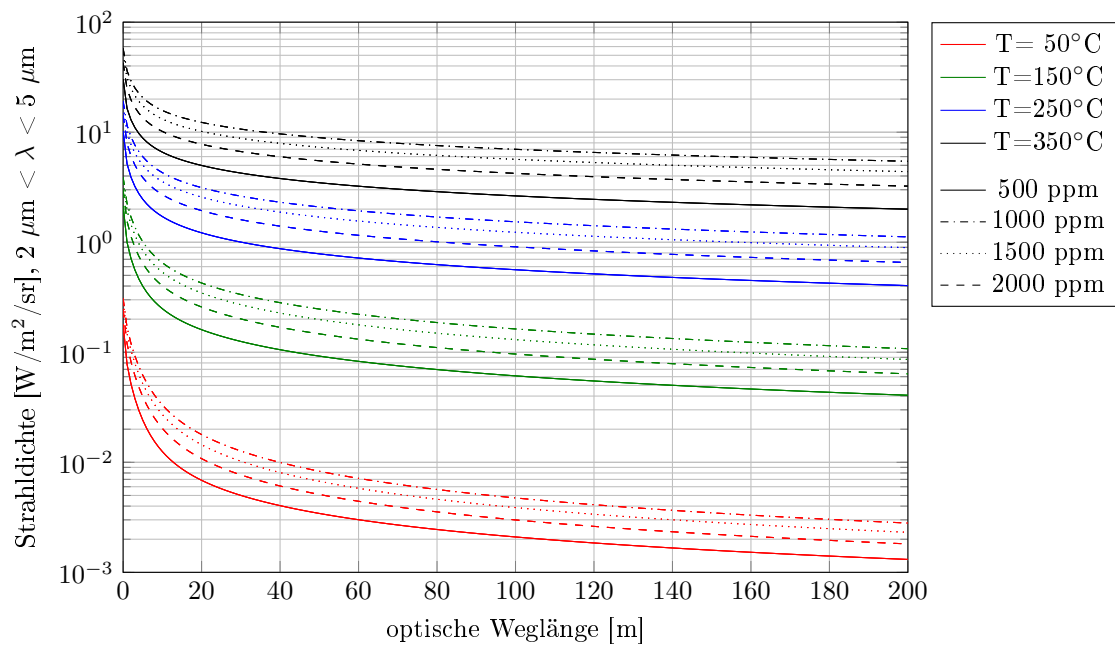


Abbildung 3.4.: Einfluss der Wegstrecke, der Konzentration und der Temperatur auf die Strahldichte von CO_2 . Eine Erhöhung der Temperatur oder der Konzentration führt zu einer erhöhten Strahldichte. Über den Weg durch die Atmosphäre wird die Strahlung abgeschwächt.

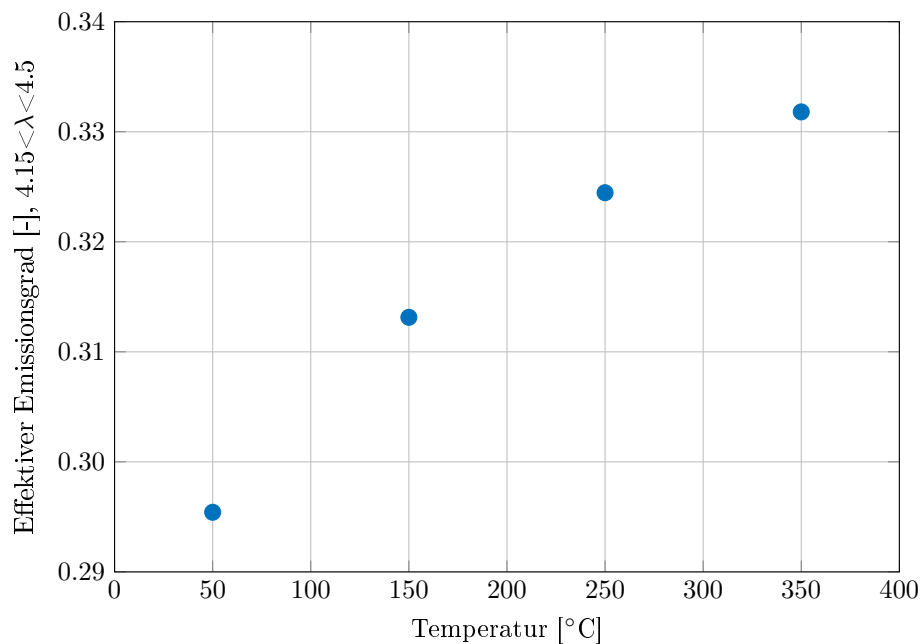


Abbildung 3.5.: Effektiver Emissionsgrad im Bereich der $4,3 \mu m$ Bande über die Temperatur aufgetragen. Der effektive Emissionsgrad steigt mit Temperatur

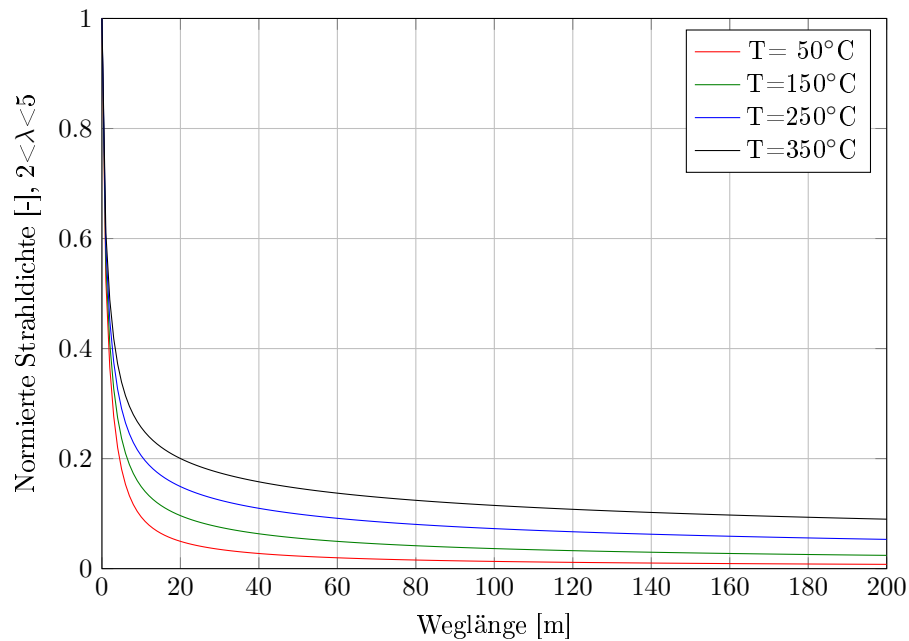


Abbildung 3.6.: Normierte Strahldichte in Abhängigkeit der Wegstrecke durch die Atmosphäre. Die bei höheren Temperaturen emittierte Strahlung wird durch die Atmosphäre weniger stark abgeschwächt. Die Werte sind auf die Strahldichte ohne Atmosphäreinfluss normiert.

3.4. IIT zur Bestimmung von Temperaturen

Mit der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Methodik ist es theoretisch möglich, aus der Leistungsdichte der emittierten Strahlung die Gastemperatur zu bestimmen. Allerdings ist die Bestimmung von Gastemperaturen mittels Infrarotthermographie generell komplexer als die von Oberflächen und derzeit noch nicht durch kommerzielle Kameras umgesetzt. [VM10, S. 397 ff.] Im Folgenden steht Gas für das zu untersuchende Medium, z.B. im Fall der IIT für den Tracer, wohingegen das Medium zwischen dem zu betrachtenden Gas und der Kamera als Atmosphäre bezeichnet wird. Will man die Temperatur eines Gases berechnen, so muss man die Strahlungstransportgleichung (s. Gl. 2.12) zwischen Kamera und Gas lösen. Hierzu ist es sinnvoll, eine Strahlungsbilanz um die Kamera aufzustellen. Die Strahlungsbilanz ist in Abbildung 3.7 dargestellt und umfasst 9 Beiträge:

1. Vom Gas emittierte Strahlung zur Kamera
2. Von der Atmosphäre emittierte Strahlung zur Kamera
3. Von Objekten emittierte Strahlung zur Kamera
4. Am Gas reflektierte/gestreute Strahlung, die ursprünglich von Objekten stammt
5. Am Gas reflektierte/gestreute Strahlung, die urspr. von der Atmosphäre stammt
6. An der Atmosphäre reflektierte/gestreute Strahlung, die urspr. vom Gas stammt
7. An der Atmosphäre reflektierte/gestreute Strahlung, die urspr. von Objekten stammt
8. An Objekten reflektierte/gestreute Strahlung, die urspr. vom Gas stammt

9. An Objekten reflektierte/gestreute Strahlung, die urspr. von der Atmosphäre stammt

Die Strahlungstransportgleichung umfasst 4 Terme auf der optischen Wegstrecke: Zugewinne durch Emission (2), Verluste durch Absorption und Ausstreuung und Zugewinn durch Einstrahlung (6,7). Die Beiträge 3,8 und 9 sind hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt, da Festkörper bei ähnlicher Temperatur den Beitrag der Gasstrahlung deutlich übertreffen und daher nicht bei der Messung von Gasen abgebildet werden sollten. Die Streuung kann bei Kenntnis der Zusammensetzung der Atmosphäre und des Gases sowie der Beladung mit bspw. Staubpartikeln über die Rayleigh oder Mie Streuung berechnet werden. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die vom Gas ausgehende Strahlung sich nicht nur durch die thermische Emission, sondern auch aus der Streuung bzw. Reflektion der Strahlung der Atmosphäre und von Objekten zusammensetzt (1,4 und 5). Ein weiteres Problem stellt die Detektion durch die Infrarotkamera dar. Die auf die Infrarotkamera auftreffende Strahlung wechselwirkt mit der Kameraoptik und wird durch etwaige Filter abgeschwächt. Die auf den Detektor auftreffenden Photonen werden dann in elektrische Signale umgewandelt, wobei dies von der Quanteneffizienz, das ist der Anteil der genutzten Photonen pro Wellenlänge, abhängig ist [VM10, S. 73 ff.]. Bevor ein Signal an den Benutzer ausgegeben wird, wird die Nichtuniformitäts-Korrektur durchgeführt und je nach Kamera bzw. Einstellung die Strahlung über Kalibrierkurven in eine Temperatur umgerechnet. Hierbei ist zu beachten, dass Nichtuniformitäts-Korrektur und die Kalibrierung an schwarzen bzw. grauen Körpern durchgeführt und somit nicht die spektralen Strahlungseigenschaften von Gasen nachgebildet werden. Selbst wenn man bis hierher die Intensität der emittierten Strahlung mit vernachlässigbar kleinen Fehlern bestimmt hat,

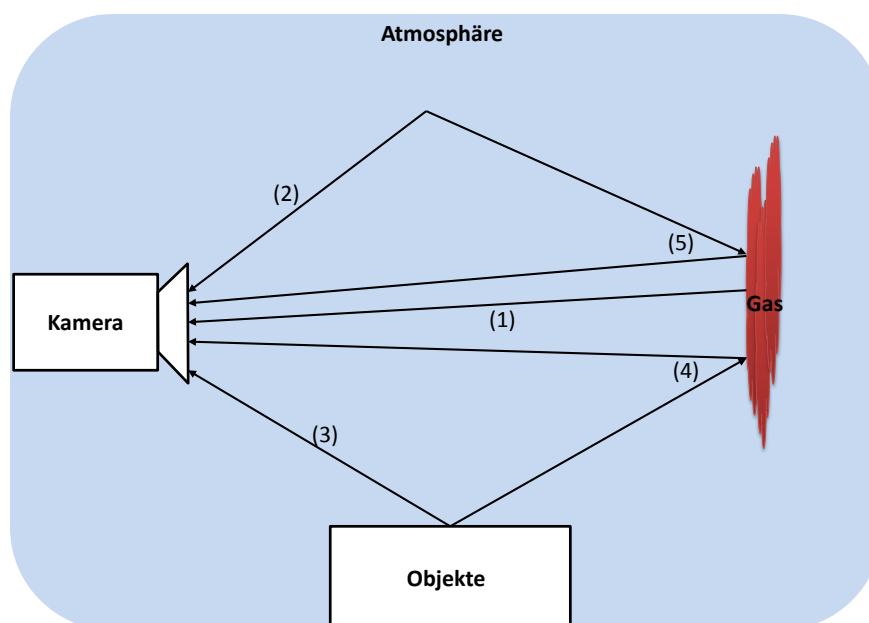


Abbildung 3.7.: Strahlungsbilanz um die Kamera. Die Erklärung der einzelnen Strahlungsanteile wird im Text beschrieben, wobei hier nur die ersten fünf Komponenten eingezeichnet sind.

wird noch die Konzentration des Gases sowie die Breite, auf der die Strahlung emittiert wird, benötigt, um eine Temperatur berechnen zu können.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Berechnung der Gastemperatur aus dem Signal einer Infrarotkamera theoretisch möglich ist, hierfür allerdings ein erheblicher Informationsbedarf besteht, der in der Praxis in der Regel nicht gedeckt werden kann. Eine Alternative für die Praxis kann eine Kalibrierung auf das zu untersuchende Gas darstellen, sofern man das Gas weitgehend von der Strahlung andere Objekte isolieren kann, so dass man lediglich die Abschwächung der Gasstrahlung auf dem optischen Weg berücksichtigen muss.

3.5. Fazit

CO_2 eignet sich als Tracergas für die Anwendung im STJ. Um starke Signale zu erhalten, ist eine hohe CO_2 -Konzentration wünschenswert. Allerdings ist die Temperatur der Rückführluft der ausschlaggebende Parameter. Die Temperatur wirkt sich nicht nur mit der vierten Potenz nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz aus. Sie erhöht durch die Verbreiterung der Bande außerdem den effektiven Emissionsgrad und verringert weiterhin den Anteil, der von der Atmosphäre absorbiert wird. Für die Messung sind möglichst kurze Abstände zwischen Kamera und Messobjekt zu wählen. Das IIT beschränkt sich im Wesentlichen auf die Visualisierung und die Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern. Die Temperatur des Tracergases aus der emittierten Strahlung zu berechnen, ist zwar theoretisch möglich, erfordert aber einen sehr hohen Informationsbedarf, der in der Praxis nicht gegeben ist.

4. Methodik zur Auswertung

In diesem Kapitel wird das Vorgehen bei der Auswertung der Infrarotbilder erläutert. Zunächst wird auf die Visualisierung der Bilder eingegangen (4.2) und danach auf die Geschwindigkeitsbestimmung (4.3). Die beiden Hauptpunkte bei der Visualisierung sind zunächst einmal, die Ausströmung überhaupt sichtbar zu machen und danach die Ausströmung deutlich vom Rauschen abzuheben. Diese beiden Schritte sind auch gleichzeitig Voraussetzungen für die Geschwindigkeitsbestimmung.

4.1. Nutzung von IRBIS 3 professional

Vom Hersteller der Infrarotkamera Imager IR ®8300, der Infratec GmbH, wurde auch eine Software zur Bildanalyse angeboten, IRBIS 3 professional, im Folgenden IRBIS. Es sei vorab angemerkt, dass die Software gut dazu geeignet ist, um Temperaturen aus zuvor erstellten Kalibrierungen zu bestimmen. Die Visualisierung von schwach über dem Hintergrund strahlenden Gasströmungen gehört nicht zu den Kernaufgaben der Software und aus diesem Grund sind die Möglichkeiten, was diesen Einsatzfall anbelangt, begrenzt und wurden in einem ersten Schritt ausgeschöpft.

Die besten Resultate wurden erzielt, indem ein Minimalbild von einer Videosequenz erstellt und von jedem einzelnen Bild abgezogen wurde. Bei der Bildung von einem Minimalbild über eine längere Bildfolge kann davon ausgegangen werden, dass dieses Bild einen ungestörten Hintergrund zeigt, da es zu jedem Pixel mindestens ein Bild gibt, auf dem gerade an diesem Punkt keine Strömung vorhanden ist. Nach Abzug des Minimalbildes wurde der sichtbare Bereich so angepasst, dass vorwiegend die Strömung sichtbar wurde und danach wurden verschiedene Filter angewendet. Die Software verfügt über einen Median-Filter (der den Median über drei Nachbarpixel bildet), einen Smooth-Filter (zur Glättung der Oberfläche) und einen Advanced Filter (zur Bildverbesserung). Diese Filter konnte man über eine ganze Sequenz anwenden. Darüberhinaus standen noch Filter zur Verfügung, die man nur auf einzelne Bilder anwenden konnte:

- Kammfilter: Hier werden aus den Signalen Gruppen mit einer bestimmten Frequenz herausgefiltert, wobei mehrere Filterfrequenzen mit gleichem Frequenzabstand gefiltert werden.
- Gauss Filter: Dieser Filter ist ein Frequenzfilter, bei dem sowohl Übertragungsfunktion als auch Impulsantwort eine gaußsche Glockenkurve bilden.
- Laplace Filter: Dieser Filter dient zur Kantenerkennung. Hierbei wird die Summe der beiden zweiten Ableitungen (in x- und y-Richtung) zwischen den Pixeln gebildet.
- Nutzer: Hier lassen sich einfache Filter anpassen.

Weiterhin konnte eine Interpolation verwendet werden, bei der die Auflösung des Thermogramms verdoppelt wurde und die neu entstandenen Pixel durch Interpolation der Nachbarpixel gebildet wurden. [Gmb11]

Weil die Möglichkeiten zur Bildbearbeitung in IRBIS beschränkt und die Resultate noch ausbaufähig sind, wurde die Exportfunktion der Software genutzt und alle Bilder wurden in ASCII-Dateien umgewandelt und mit MATLAB eingelesen¹.

4.2. Visualisierung

In der Literatur (z.B. [BKE⁺95, BCM05b, SYLL14]) wird ein aufgenommenes Bild g als Summe des Originalbildes f und eines Rausch- oder Störterms n gesehen:

$$g = f + n \quad (4.1)$$

In dem Fall dieser Arbeit ist nicht so sehr das Originalbild, sondern die Ausströmung von Interesse, so dass das Originalbild in ein Strömungs- s und ein Hintergrundbild h aufgespalten werden kann. Da man zur Visualisierung von Geschwindigkeiten mindestens zwei Bilder benötigt, müssen weitere Korrekturen berücksichtigt werden. So kann bspw. durch Wackeln der Kamera der Bildausschnitt verschoben werden, was einer Transformation T des Bildes entspricht. Weiterhin kann die Helligkeit zwischen zwei Bildern variieren. Dies wird durch einen Offset o dargestellt. Zusammenfassen lässt sich dies in folgender Formel:

$$g(x, y, t) = T_t(s(x, y, t) + h(x, y, t) + o(t) + n(x, y, t)) \quad (4.2)$$

x und y stellen dabei räumliche Koordinaten dar und t steht für die zeitliche Koordinate.

Aus dieser Anordnung ergibt sich das Vorgehen für die Visualisierung. Als erstes wird eine geometrische Korrektur durchgeführt und somit die Transformation aufgelöst. Danach wird eine Art Kalibrierung für jedes Bild vorgenommen, um Helligkeitsunterschiede, die als konstant über das ganze Bild angenommen werden, auszugleichen. Dann wird das Hintergrundbild abgezogen und das Rauschen durch Filter weitestgehend unterdrückt.

4.2.1. Geometrische Korrektur

Die geometrische Korrektur fand zunächst über eine Kreuzkorrelation zwischen einem Referenzbild, dem ersten Bild einer Bildfolge, und den jeweiligen anderen Bildern statt. Das Verfahren

¹Die Exportfunktion von IRBIS 3 professional ist fehlerhaft. Zum Teil werden Bilder nicht exportiert, dafür andere aber doppelt. Sollen die Daten in einem anderen Programm verarbeitet werden, sollten neben den Bildinformationen mindestens ein Parameter zur Aufnahmezeit mitexportiert werden, damit die richtige Reihenfolge wiederhergestellt und doppelte Elemente gelöscht werden können. Die Infratec GmbH wurde über diesen Fehler informiert.

ist das gleiche, das beim PIV zum Einsatz kommen kann (vgl. 2.2.3) mit dem Unterschied, dass nicht ein kleiner Bildausschnitt, sondern das gesamte Bild betrachtet wird. Aufgrund des starken Rauschens in den Daten konnte die Kreuzkorrelation die Verschiebung nicht zuverlässig erkennen. Aus diesem Grund wurde ein anderes Verfahren gewählt. Die Receiverfläche ist auf den Bildern als weiße Fläche gut erkennbar. Da die Infrarotkamera auf den Bereich der Gasstrahlung eingestellt ist, überstrahlt der Receiver den Messbereich und hat somit eine Strahlungsintensität maximaler Größe. Nun wird das Graustufenbild in ein Binärbild umgewandelt, so dass die Receiverfläche weiß und der Rest des Bildes schwarz dargestellt wird. Dann werden 4 Punkte definiert, je die maximale und minimale x- und y-Position der Receiverfläche. Bewegt sich die Position von mindestens zwei Punkten während eines Bildwechsels in die gleiche Richtung, wird dies als Verschiebung gewertet und kompensiert. Es ist anzumerken, dass bei den Videos im Wesentlichen keine Verschiebung korrigiert wird.

4.2.2. Kalibrierung des Bildes

Mögliche Variationen in der Belichtungsdauer, die Beobachtung von instationären Vorgängen oder Ähnliches führen dazu, dass zwei aufeinanderfolgende Bilder unterschiedliche Helligkeiten aufweisen können. Dies wird hier dadurch kompensiert, dass über einen Hintergrundbereich, der eine konstante Temperatur aufweisen sollte, im Referenzbild ein Mittelwert gebildet wird. Im selben Bereich wird in jedem anderen Bild auch ein Mittelwert gebildet und die Differenz hiervon zum Referenzmittelwert als Offset addiert oder subtrahiert.

4.2.3. Hintergrundbild entfernen

Um die Strömung vom Hintergrund zu trennen, wird ein Hintergrundbild abgezogen. Hier wurden drei Ansätze untersucht. Zum einen wurde ein statisches Minimalbild einer Filmsequenz erstellt und abgezogen, zum anderen ein dynamisches Minimalbild, das das Minimum einer gewissen Nachbarschaft um das derzeitige Bild (hier 20 Bilder vor- und nachher) bildet, das ebenfalls subtrahiert wurde. Unter dem Minimalbild ist der kleinste Wert für jeden Pixel von mehreren Bildern zu verstehen. Der Grund für die Wahl von Minimalbildern liegt in der Annahme, dass bei turbulenten Strömungen in einer hinreichend langen Bildfolge jeder Pixel mindestens zu einem Zeitpunkt keine Strömung darstellt. Der dritte Ansatz besteht aus dem Differenzbild zum jeweils vorherigen Bild. Hierdurch wird die Konturänderung der Strömung sichtbar, wohingegen Bereiche mit konstanter Strömung verschwinden.

Das dynamische Minimalbild wurde an einer Bildfolge von 600 Bildern getestet und das Ergebnis mit der Implementierung des statischen Minimalbildes verglichen. Es hat sich gezeigt, dass die Offsetkorrektur (4.2.2) in Verbindung mit dem statischen Minimalbild bei transienten Vorgängen, bspw. der Erwärmung des Receivers, über eine längere Bildfolge zu deutlich unterschiedlichen Helligkeiten führt. Dies kann über das dynamische Minimalbild besser kompensiert werden, so dass dynamische Minimalbilder dem statischen Minimalbild vorzuziehen

sind. Differenzbilder wurden in der Form erstellt, dass von einem Video mit statischen Hintergrundbild das vorhergehende Bild von dem nachfolgenden subtrahiert wurde. Allerdings wies der Abzug eines dynamischen Hintergrundbildes eine bessere visuelle Qualität auf und hierbei lieferte auch der PIV-Algorithmus bessere Ergebnisse. Deshalb wird einzig die Subtraktion eines dynamischen Hintergrundbildes im Folgenden verwendet.

Nach Abzug des Hintergrundbildes ist die Strömung zwar sichtbar, allerdings ist der dynamische Bildbereich über die größten Intensitätsunterschiede bestimmt, die tendenziell durch den Receiver und den Hintergrund bestimmt werden. Im Vergleich zu diesen Intensitätsunterschieden ist die Änderung der Strömung nur relativ klein, weshalb diese einer solchen Darstellung nur relativ schwach sichtbar ist. In einem weiteren Schritt wird der dargestellte Intensitätsbereich für das erste Bild einer Sequenz manuell so angepasst, dass im Wesentlichen die Strömung gezeigt wird.

4.2.4. Glätten/Smoothing

Sofern die vorherigen Schritte erfolgreich waren, sollte ab hier nur noch das Signal und Rauschen vorhanden sein. Das Rauschen kann durch Filter unterdrückt werden. Grob lassen sich Filter anhand der Dimensionen, in denen sie wirken einteilen. Tabelle 4.1 stellt die hier untersuchten Filter vor. Eindimensionale Filter arbeiten entweder entlang der Zeit oder einer räumlichen Koordinate, 1D + 1D Filter entlang einer räumlichen und der zeitlichen Koordinate. Filter, die entlang nur einer räumlichen Koordinate arbeiten, sind hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt und können dazu dienen, um Fehler oder Eigenheiten zu entdecken wie bspw. verschiedene Ausleseeinheiten pro Linie. 2D Filter funktionieren im räumlichen und 3D-Filter im räumlichen und zeitlichen Bereich.

Tests für sämtliche existierende Filter mit allen Variationen würden den Rahmen einer jeder Arbeit sprengen und deshalb sicherlich nicht zielführend sein. In dieser Arbeit wurde ein Auswahl getroffen, wobei versucht wurde, aus größeren Filterklassen mindestens einen Algorithmus zu implementieren. Mit Ausnahme der Wavelets und des V-BM3D werden die hier verwendeten Algorithmen nur kurz angeschnitten und weitere Informationen sei der entsprechenden Literatur zu entnehmen. Folgende Filter wurden betrachtet:

Moving Average: Bei diesem Verfahren wird der Mittelwert über einer gewissen Anzahl an Bildern verwendet, wobei sich der Bereich, über den gemittelt wird, mit dem jeweiligen Bild mitbewegt.

Isotrope Diffusion: Bei diesem Filter wird die Pixelintensität als Konzentration bzw. Temperatur aufgefasst und mit der Diffusionsgleichung bzw. Wärmeleitungsgleichung lässt sich die Änderung der Intensität über die Zeit berechnen: $I_t = c(x, y, t)\Delta I + \nabla c \cdot \nabla I$. Gradienten zwischen den Pixelintensitäten werden hierdurch abgebaut und das Bild geglättet. Da dabei auch Kanten geglättet werden, haben Persona und Malik [PM90] einen variablen Diffusionskoeffizienten eingeführt, der in annähernd homogenen Gebieten gegen eins und an Kanten gegen

Tabelle 4.1.: Übersicht über die betrachteten Filter

1 D räumlich oder zeitlich	1D+1D räumlich und zeitlich	2D räumlich	3D räumlich und zeitlich
bewegter Mittelwert	Mittelwert	Wavelets	BM3D
		Anisotrope Diffusion	
		Nicht-locale Mittelwerte	
		Gauss	
		Isotrope Diffusion	
		Bayes	
		Median	
		Wiener	

null geht². Parameter für diesen Algorithmus sind zum einen die Laufzeit und zum anderen die Standardabweichung, die in die Berechnung des Diffusionskoeffizienten eingeht. Jancsár, Iványi [JI06b] und Anweiler [Anw09] haben durch einen Ansatz mit isotroper Diffusion, bei der der Diffusionskoeffizient über eine Fuzzy-Logik bestimmt wurde, Dampfströmungen mittels Infrarotthermographie visualisiert. Die Größe des Diffusionskoeffizienten war hierbei von dem lokalen Mittelwert und dem Gradienten der Intensität abhängig. Dies soll in dieser Arbeit durch den einfacheren Ansatz nach Persona und Malik abgeschätzt werden.

Anisotrope Diffusion: Die Basis der anisotropen Diffusion ist die gleiche wie die der isotropen Diffusion. Allerdings ist hier der Diffusionskoeffizient abhängig von der Richtung des Gradienten. Senkrecht zum Gradienten ist der Koeffizient groß, parallel dazu klein bis 0, so dass Kanten besser erhalten bleiben als im isotropen Fall. [Wei98, S. 22 ff.]

Bayes: Bei diesem Verfahren wird nicht von additivem Rauschen, sondern von multiplikativen ausgegangen und deshalb wird das Bild logarithmiert. Dann wird eine Bayes Regression über ähnliche Nachbarschaften durchgeführt und das Ergebnis wieder delogarithmiert. Parameter sind die Fenstergröße und die Standardabweichung, die maßgeblich dafür ist, wie viel ähnliche Nachbarschaften gefunden werden. [WMBC10]

NL-mean: Beim nicht-lokalen Mittelwert werden nicht nur angrenzende Elemente gemittelt, sondern sämtliche Elemente im ganzen Bild werden gewichtet einbezogen. Die Größe der Gewichte hängt davon ab, wie ähnlich sich die Mittelwerte der Nachbarschaften des betrachteten Pixels und der anderen Pixel im Bild sind. Die Form der Gewichtsfunktion ist eine Gauß'sche Glocke, die mit einem Smoothingparameter variiert werden kann. Ein weiterer Parameter ist die Größe der Nachbarschaft. [BCM05a]

Median: Der Medianfilter ordnet eine $m \times n$ Pixel große Nachbarschaft der Größe nach. Sofern die Anzahl der Pixel in der Nachbarschaft (inklusive dem zentralen Pixel) ungerade ist, wird das mittlere Element der geordneten Pixel als zentrales Element der Nachbarschaft gesetzt, andernfalls wird der Mittelwert der beiden mittleren Elemente verwendet. Im Vergleich

²In der Literatur wird dies zum Teil schon als anisotrope Diffusion bezeichnet. Diese Arbeit folgt der Definition von Weickert [Wei98, S. 15] nach der Diffusion anisotrop ist, wenn die Größe des Diffusionskoeffizienten richtungsabhängig ist.

zum einfachen Mittelwert ist der Median robust gegen Ausreißer [GWE09, S. 125 ff.]. Es sei angemerkt, dass es von dem Medianfilter zahlreiche Erweiterungen entwickelt wurden (z.B. [KW09]), hier allerdings der Einfachheit halber die ursprüngliche Form verwendet wurde.

Gauß: Der Gaußfilter kann als modifizierter Mittelwertfilter gesehen werden. Beim Mittelwertfilter werden alle Elemente mit eins gewichtet, wohingegen die Gewichtung bei dem Gaußfilter eine Gaußverteilung aufweist. Als Parameter wird neben der Filtergröße auch die Standardabweichung benutzt.[Erh08, S. 149]

Wiener: Dieser Filter bestimmt den lokalen Mittelwert μ und die lokale Varianz σ^2 einer $m \times n$ Pixel großen Nachbarschaft um den zentralen Pixel. Der Wert für den zentralen Pixel wird über eine Geradengleichung berechnet, wobei die Steigung die relative Abweichung des Mittelwertes von allen lokalen Varianzen zur lokalen Varianz und die Abszisse die Differenz der Intensität des zentralen Pixels und des lokalen Mittelwertes der Intensitäten ist: $g_{Wiener} = \mu + \frac{\sigma^2 - \nu^2}{\sigma^2} \cdot (g_0 - \mu)$ [Mat06]

Wavelets: Wavelets kann man ins Deutsche als Wellchen übersetzen. Die Idee hinter diesem Ansatz ist es, das Bild als Summe dieser Wellen, die je nach Transformation unterschiedliche Formen aufweisen können, darzustellen. Dies ist prinzipiell der gleiche Ansatz wie bei der Fouriertransformation, in der das Bild durch die Summe von Sinus- und Kosinusfunktionen dargestellt werden soll. Im Gegensatz zu Fouriertransformationen sind die Wavelets keine periodischen Funktionen, die nur Aussagen über die Frequenz treffen können, sondern räumlich lokalisierte Funktionen, die aus diesem Grunde auch Informationen zu räumlichen Eigenschaften des Bildes enthalten. Als Beispiel sei hier das erste gefundene Wavelet, das Haar-Wavelet, gezeigt, Abbildung 4.1.

Auf Grundlage dieser Funktion wird das Bild als Summe gestreckter und verschobener Funktionen dargestellt:

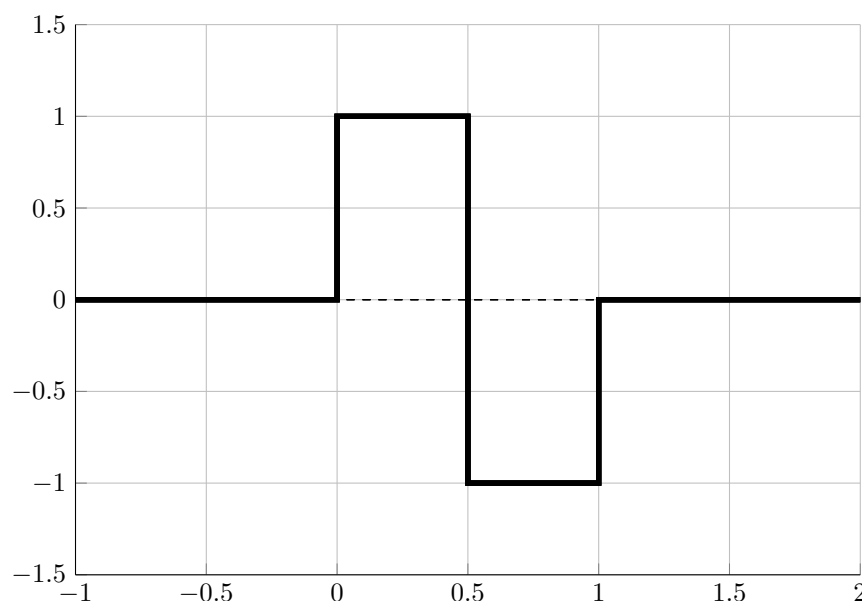


Abbildung 4.1.: Haar Wavelet

$$f = \sum_{k \in J} c_k \psi_k \quad (4.3)$$

Hierbei ist ψ_k die Wellenfunktion und c_k der Gewichtungskoeffizient. Hinter der Rauschunterdrückung mit dieser Methode steht die Annahme, dass das Originalbild aus einer Kombination von wenigen Wellen aufgebaut ist, die dementsprechend große Koeffizienten aufweisen. Wellen, die das Rauschen darstellen, weisen geringe Koeffizienten auf. Nun wird ein Grenzwert τ eingeführt. Setzt man alle Koeffizienten, die kleiner als τ sind zu null, spricht man von Hard Thresholding. Problematisch ist hierbei, dass das Vorhandensein von relativ kleinen Signalen meist schon ausreicht, um einen Großteil des Rauschens über den Grenzwert zu heben. Aus diesem Grunde hat sich auch das Soft Thresholding durchgesetzt, bei dem größere Koeffizienten um τ abgeschwächt werden.

$$\text{Hard Thresholding: } \tilde{c}_k := \begin{cases} 0 & \text{falls } |c_k| \leq \tau \\ c_k & \text{falls } |c_k| > \tau \end{cases}$$

$$\text{Soft Thresholding: } \tilde{c}_k := \begin{cases} 0 & \text{falls } |c_k| \leq \tau \\ \text{sign}(c_k) \frac{|c_k| - \tau}{|c_k| + \tau} & \text{falls } |c_k| > \tau \end{cases}$$

Über eine Rücktransformation kann nun ein Bild mit weniger Rauschen erzeugt werden. [GWE09, 377 ff.], [Bän02] Es ist anzumerken, dass das Ergebnis sowohl von der Wahl der Waveletbasis als auch von dem Signal bzw. dem Bild abhängt. [DFKE07] Jancsár, Iványi [JI06a] und Anweiler [Anw09] haben zur Visualisierung einer Dampfströmung auch eine Wavelet-Transformation auf Basis des biorthogonalen 1.5 Wavelet angewendet. Bei der Filterauswahl wurden deshalb hier das biorthogonale 1.5 sowie das 1.3 Wavelet ausgewählt. Letztere Wahl stammt daher, dass dieses Wavelet im nachfolgend beschriebenen (V)-BM3D Algorithmus verwendet wird.

(V)-BM3D: Der „Blockmatching 3D“ Algorithmus bzw. die Erweiterung auf Videos als V-BM3D ist eine Kombination von mehreren Filtern und in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Abkürzung resultiert daraus, dass Blöcke gesucht werden („Blockmatching“) und die gefundenen zweidimensionalen Blöcke zu dreidimensionalen Gruppen gefasst werden. Der Algorithmus besteht im Wesentlichen aus zwei ähnlich aufgebauten Stufen, die ihrerseits wieder aus mehreren Schritten aufgebaut sind. In dem ersten Schritt werden zunächst für jeden Block im Bild ähnliche Blöcke im selben Bild oder bei vorherigen oder folgenden Bildern gesucht. Der Block, zu dem ähnliche Blöcke gesucht werden, wird Referenzblock genannt. Die Ähnlichkeit zwischen einem beliebigen Block und dem Referenzblock wird über die Größe der euklidischen Norm zwischen den beiden Blöcken bestimmt, wobei in der ersten Stufe die Blöcke vorgefiltert werden, um in einem verrauschten Bild ähnliche Blöcke hinreichend gut finden zu können. Alle Blöcke, bei denen die Norm kleiner als ein Grenzwert ist, bilden eine Gruppe. Da die Differenz von dem Differenzblock zu sich selbst null ist, enthält jede Gruppe mindestens ein Element. Die Gruppen werden dann zunächst einer 2D-Wavelettransformation für jeden Block und danach einer 1D-Wavelettransformation zwischen den Blöcken unterzogen, wobei Koeffizienten, die

kleiner als ein Grenzwert sind, vernachlässigt werden. Die rücktransformierten Blöcke weisen hierdurch ein geringeres Rauschen auf. Da eine Überlappung der Blöcke nicht ausgeschlossen wurde, werden sich überlappende Bereiche durch einen gewichteten Mittelwert ersetzt.

In der zweiten Stufe wird das Ergebnis der ersten Stufe benutzt, um wieder ähnliche Blöcke zu finden und zu gruppieren. Zusätzlich wird eine zweite Gruppe erstellt, die Blöcke an der gleichen Position aus dem ursprünglichen Bild sammelt. Dann werden beide Gruppen über eine diskrete Kosinustransformation in einen Frequenzbereich übertragen. Auf die zweite Gruppe wird ein empirischer Wiener Filter angewendet, wobei die erste Gruppe als Pilotspektrum dient. Danach wird die gefilterte Gruppe wieder zurücktransformiert und sich überlappende Bereiche durch einen gewichteten Mittelwert ersetzt. Der Wiener Filter mit dem Pilotspektrum ist genauer als die einfache Grenzwertsetzung bei der Wavelettransformation. [DFE07, DFKE07]. Obwohl diese Methode vor bald 10 Jahren vorgeschlagen wurde, gehört sie noch immer zum „state-of-the-art“ bei der Rauschentfernung. [SYLL14]

4.2.4.1. Bewertung

Es gibt im Wesentlichen 3 Bewertungsmaßstäbe für die Güte eines Filters [BCM05b]. Dies ist zum einen die visuelle Qualität, zum anderen das methodische Rauschen, die beide durch den Beobachter bewertet werden. Die Standardabweichung zwischen Originalbild und dem geglätteten Bild wird häufig über die Peak-Signal-to-Noise Ratio ausgedrückt:

$$PSNR = 20 \cdot \log_{10} \frac{R}{\sqrt{\sum_{i \in I} [u(i) - \hat{u}(i)]^2}} \quad (4.4)$$

Hierbei ist \hat{u} das durch den Filter geglättete Bild und $u(i)$ das Bild ohne Rauschen. R gibt die maximale Signalstärke an. Dieses Kriterium dient in der Literatur dazu, Filter zu bewerten, wobei einem Originalbild das Rauschen künstlich hinzugefügt wird und damit die Fähigkeit des Filters, das künstliche Rauschen zu entfernen, charakterisiert wird. Durch den Aufnahmeprozess wird das Bild mit dem Rauschen überlagert, so dass dieses Kriterium für die in dieser Arbeit

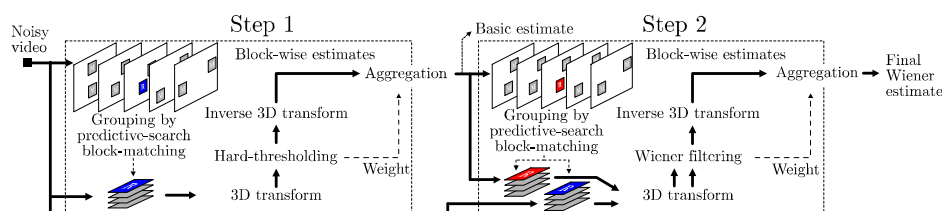


Abbildung 4.2.: Aufbau des BM3D-Algorithmus. Die Bilder werden eingelesen und ähnliche Elemente gruppiert. Gruppen werden über Wavelets geglättet und Elemente, die in mehreren Gruppen eingeordnet wurden, durch gewichtete Mittelwerte ersetzt. In einem zweiten Schritt werden die bereits geglätteten Elemente benutzt, um einen Wiener Filter auf die ursprünglichen Daten anzuwenden. [DFKE07]

erstellten Aufnahmen nicht verwendet werden kann. Auch können die Filter nicht direkt mit den Literaturwerten der PSNR untereinander verglichen werden, da das Filterergebnis stark von den benutzten Referenzbildern abhängt.

Das methodische Rauschen ist der Teil des Bildes, der nach Abzug des geglätteten Bildes von der Originalaufnahme übrig bleibt. Da die in diesem Teil eingesetzten Filter das Bild glätten und somit sämtliches Rauschen entfernen sollen, besteht das Differenzbild im Idealfall nur noch aus Rauschen und besitzt eine maximale Amplitude. Sind im methodischen Rauschen Strukturen erkennbar, ist die Filterwirkung zu stark und durch das Glätten sind Informationen verloren gegangen.

Zur Bewertung der Filter wurden zwei Testsequenzen, je eine für beide im folgenden Kapitel beschriebenen Hauptmessungen, die beide aus 25 Bildern bestanden, verwendet. Auf beide Sequenzen wurden die Preprocessing-Schritte (4.2.1-4.2.3) angewendet, wobei hier aufgrund der kurzen Bildfolge ein statisches Minimalbild verwendet wurde. Die Eingabeparameter der Filter wurden ausgehend von den in der entsprechenden Literatur vorgeschlagenen Parametern bzw. sofern keine Vorschläge gemacht wurden, ausgehend von den Standardeinstellungen des jeweiligen Algorithmus in einer breiten Umgebung grob variiert. Die Bewertung erfolgte über die visuelle Qualität und das methodische Rauschen, wobei für jeden Filter das Ergebnis des 13. Bildes der jeweiligen Testsequenz betrachtet wurde. Ausgehend von dieser ersten, groben Variation der Parameter, wurden die Parameter noch einmal in der Umgebung der besten Parameter der jeweiligen Algorithmen feiner variiert und wieder über die beiden Kriterien bewertet.

4.2.5. Image Enhancement

In diese Kategorie gehören Filter und andere Maßnahmen, um die Informationen in den Bildern stärker hervorzuheben. So können bspw. Kanten durch den Sobelfilter hervorgehoben und der Bereich der Ausströmung vom Rest des Bildes getrennt werden, sog. Segmentierung. Hier wurden die erstellten Graustufenbilder lediglich mittels einer Farbkarte in ein Falschfarbenbild umgewandelt. Die Bilder in den Videos enthalten einen Informationsgehalt von 8-Bit, was 256 Graustufen entspricht. Ein menschlicher Beobachter kann allerdings nur etwa 128 Grautöne unterscheiden. Durch die Transformation in den Farbraum kann der volle Informationsgehalt wahrgenommen werden. [VM10, S. 157 ff.] Es wurde die Farbkarte „Jet“ verwendet, die in Matlab implementiert ist. Abbildung 4.3 zeigt die Farbkarte. Geringe Grauwerte werden bläulich, hohe Grauwerte rötlich dargestellt.

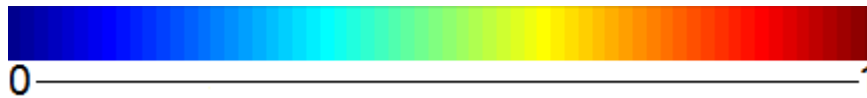


Abbildung 4.3.: Colormap Jet. Ein Grauwert von 0 entspricht hier blau und ein Wert von 1 rot.[MAT15]

4.3. Geschwindigkeitsbestimmung

Die Geschwindigkeitsbestimmung erfolgt mit der Matlab Toolbox PIVlab von Thielicke [TS14, Thi14]. Das PIV-Verfahren, vgl. 2.2.3, wurde entwickelt, um die Geschwindigkeit von Partikelmustern zu erkennen. Fluide, in denen keine Partikel erkennbar sind, zählen nicht zu den typischen Anwendungsfeldern eines PIV-Algorithmus. Die Basis des Algorithmus bildet eine Kreuzkorrelation, die die Ähnlichkeit zwischen einem Bildausschnitt aus einem ersten Bild und einem Ausschnitt aus dem darauf folgenden Bild bestimmt. Bei einer größeren Ausströmung, bei der eine Fläche ähnliche Pixelintensitäten aufweist, kann eine Kreuzkorrelation keine Information zu Bewegungen beitragen. Allerdings kann die Bewegung der Kanten zwischen der Ausströmung und dem Hintergrund nachvollzogen werden, so dass dieser Algorithmus grundsätzlich zur Geschwindigkeitsbestimmung angewendet werden kann.

Die geglätteten Daten wurden zunächst vorverarbeitet. Hierzu wurde eine „Contrast limited adaptive histogram equalization“ (CLAHE) angewendet. Hierbei wird das Histogramm kleinerer Bildausschnitte verbreitert, so dass der volle Intensitätsbereich ausgeschöpft wird. Damit hierdurch keine Artefakte zwischen den Bildausschnitten entstehen, werden benachbarte Pixel interpoliert. CLAHE führt zu einer signifikanten Verbesserung der Erkennung gültiger Geschwindigkeitsvektoren. Des Weiteren wird ein „Intensity capping“ durchgeführt. Pixel mit hohen Intensitäten gehen stark in die Kreuzkorrelation ein. Damit die Partikel ähnlicher gewichtet werden, wird ein oberer Grenzwert für die Intensität eingeführt. [Thi14]

Die Kreuzkorrelation wird hier im Frequenzbereich über eine diskrete Fourier-Transformation berechnet. Dies erfolgt in drei Schritten. In dem ersten Schritt wird eine Fenstergröße von 32 Pixeln gewählt und in Achterschritten bewegt. Die hierbei gewonnenen Bewegungsinformationen werden benutzt, um das ursprünglich quadratische Betrachtungsfenster zu verformen und an die Bewegung anzupassen. Dies wird über eine Spline-Interpolation der Fensterecken durchgeführt. Im zweiten Schritt wird ein deformiertes Betrachtungsfenster mit einer Größe von 16 Pixeln und ebenfalls in Achterschritten bewegt. Die daraus erhaltenen Informationen werden wieder benutzt, um das Betrachtungsfenster für den letzten Schritt anzupassen. Im letzten Schritt wird eine Fenstergröße von acht Pixeln bei einer Schrittweite von vier Pixeln gewählt. Die Kreuzkorrelation kann Verschiebungen auf einen Pixel genau bestimmen. Um die Verschiebung im Subpixelbereich zu bestimmen, wird angenommen, dass die Werte der Kreuzkorrelation normal verteilt sind. Um das eigentliche Maximum zu bestimmen, wird eine zweidimensionale Gaußinterpolation durchgeführt. In einem darauf folgenden Schritt werden Geschwindigkeitsvektoren, die physikalisch unsinnige Werte aufweisen, gelöscht. Dazu wird

jeder Vektor mit seinen Nachbarvektoren verglichen und, sofern deutliche Abweichungen in Geschwindigkeit oder Richtung auftreten, gelöscht. Dieser Vergleich erfolgt über die Standardabweichung und den lokalen Mittelwert. Gelöschte Vektoren werden durch einen interpolierten Wert der Nachbarvektoren ersetzt. Die so gefundenen Geschwindigkeitsfelder wurden gemittelt, um ein Strömungsfeld einer ganzen Sequenz zu berechnen. Durch das Mitteln können lokal falsche Geschwindigkeiten entfernt werden. [Thi14]

5. Messungen

In den nächsten drei Abschnitten werden die durchgeführten Messungen beschrieben. Die erste Messung fand an der Forschungsebene statt, Abschnitt 5.1. Zwei Messungen wurden am Hauptreceiver vorgenommen, Abschnitt 5.2. Hierbei wurde zunächst im solaren Betrieb gemessen, d.h. die Heliostate bündeln das Sonnenlicht auf den Receiver, durch den Luft eingesogen wird, wie in der Einleitung beschrieben. Die Luft wurde an diesem Messtag durch den thermischen Speicher geführt und wieder im Receiver ausgeblasen. Eine zweite Messung wurde ohne Bestrahlung durchgeführt, wobei das Abgas einer Verbrennung betrachtet wurde, das eine erhöhte CO_2 -Konzentration erreichte. Gegenstand der letzten Messung war ein Braunkohlekraftwerk, bei dem zum einen der Dampf eines Kühlturms und zum anderen das Rauchgas der Verbrennung beobachtet wurden. Diese Messung wurde über eine deutlich höhere Entfernung durchgeführt.

Bei allen Messungen war der prinzipielle Versuchsaufbau, der exemplarisch in Abbildung 5.1 an einer Messung am Hauptreceiver gezeigt ist, gleich. Bilder wurden mittels einer Infrarotkamera erstellt und auf den Messrechner übertragen. Die hier eingesetzte Kamera war eine ImagerR®8300 von der Firma InfraTec GmbH. Diese Kamera ist für den Mittelwellen-Infrarotbereich geeignet und detektiert im Bereich von 2 bis 5 μm . Die Auflösung beträgt 640x512 Pixel. Es wurden ein 100mm Teleobjektiv und ein Flammenfilter mit einem Transmissionspeak bei ca. 4,3 μm eingesetzt. Genauere Daten zur Kamera und zum Transmissionsspektrum des Filters befinden sich im Anhang, B bzw. C. Entsprechend der erwarteten Temperatur und des eingesetzten Filters wurde eine Integrationszeit von 800 μs für die Messung an der Forschungsebenen gewählt. Nach dieser Messung wurde die Kamera kalibriert, wonach die Integrationszeit für den entsprechenden Temperaturbereich auf 1060 μs erhöht wurde. Mit dieser Einstellung wurden alle weiteren Messungen durchgeführt. Die Aufnahmen von der Kamera wurden auf einen Messrechner übertragen und mit der Software IRBIS 3 professional von der gleichen Firma vorverarbeitet und gespeichert.

5.1. Messung an der Forschungsebene

Die erste Messung fand an der Forschungsebene des STJ statt. Diese Ebene befindet sich etwa auf halber Turmhöhe und ermöglicht Experimente unter solarer Bestrahlung. Abbildung 5.2 zeigt den apparativen Aufbau. Durch den bestrahlten Receiver wird Luft eingesogen, erwärmt sich dabei (sie wird deshalb Heißluft genannt) und durch die rot eingezeichnete Leitung geführt. Am Ende dieser Leitung befindet sich ein Kühler, der einen Großteil der thermischen Energie abführt. Da das Betriebsverhalten des STJ in der Forschungsebene widerspiegelt werden soll, wird die Heißluft nicht auf Umgebungstemperatur abgekühlt, sondern auf ca. 100 bis 200°C gehalten und folglich Warmluft genannt. Die Warmluft wird von einem Gebläse angesogen



Abbildung 5.1.: Versuchsaufbau am Hauptreceiver. Die Bilder werden mittels einer Infrarotkamera aufgenommen und an den Messrechner übertragen.

und im Receiver ausgeblasen. Der Strömungsweg der Warmluft ist in der Abbildung in blau dargestellt.

Für die IIT-Messung wurde CO_2 aus einer Gasflasche durch einen Stutzen vor dem Gebläse beigemischt. Um die maximale Konzentration zu erreichen, wurde der Druckminderer bis zum Anschlag geöffnet. Durch die Turbulenzen in dem Gebläse kann davon ausgegangen werden, dass sich das Tracergas homogen verteilt und somit mit einer räumlich konstanten Konzentration vor dem Receiver ausgeblasen wird. Die genaue Konzentration wurde in diesem Versuch nicht gemessen. Die Aufnahmefrequenz betrug ca. 18 Hz, so dass in einem Messzeitraum von etwa 75 Minuten über 80.000 Aufnahmen entstanden. Abbildung 5.3 zeigt den Receiver auf der Forschungsebene als Frontansicht und Seitenansicht. Schwarz zu erkennen sind die Absorbere cups und in weiß der Strahlungsschild. Die Warmlufttemperatur schwankte in der Messzeit leicht zwischen 150 und 170°C, die Temperatur der Heißluft wurde im Bereich von ca. 240 bis 540°C variiert. Der Luftmassenstrom variierte am Anfang der Messungen um 0,5 kg/s und 0,75 kg/s am Ende der Messungen. Der Verlauf dieser Parameter ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

5.2. Messung am Hauptreceiver

Am Hauptreceiver wurden zwei Messungen durchgeführt. Die erste Messung erfolgte mit dem solar bestrahlten Receiver. Bei der zweiten Messung wurde der Receiver nicht bestrahlt, sondern die Luft durch einen Gasbrenner erhitzt und die Abgase gefilmt.

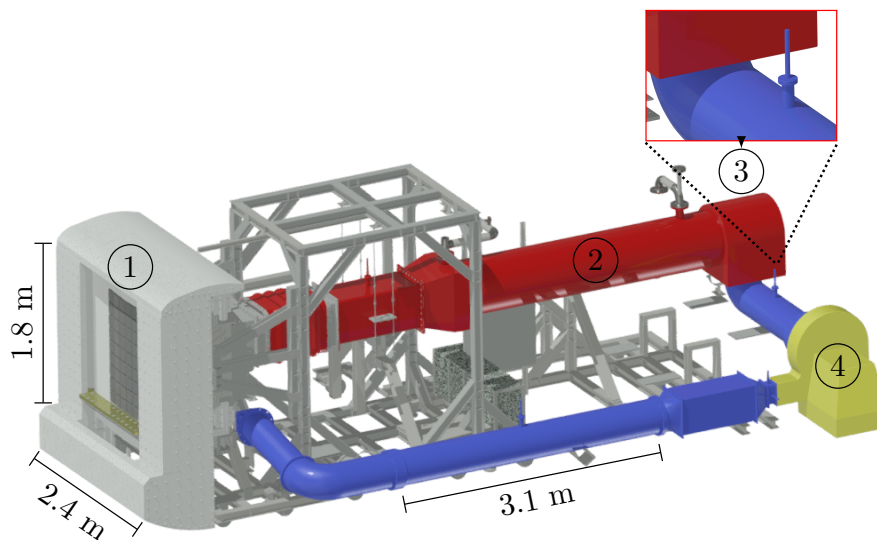


Abbildung 5.2.: Innenansicht der Forschungsebene. Luft wird durch den Receiver (1) angesaugt, im Kühler (2) abgekühlt und durch ein Gebläse (4) wieder zum Receiver gefördert. CO_2 wurde hier vor dem Gebläse eingedüst (Stelle (3)), so dass von einer homogenen Verteilung auszugehen ist.

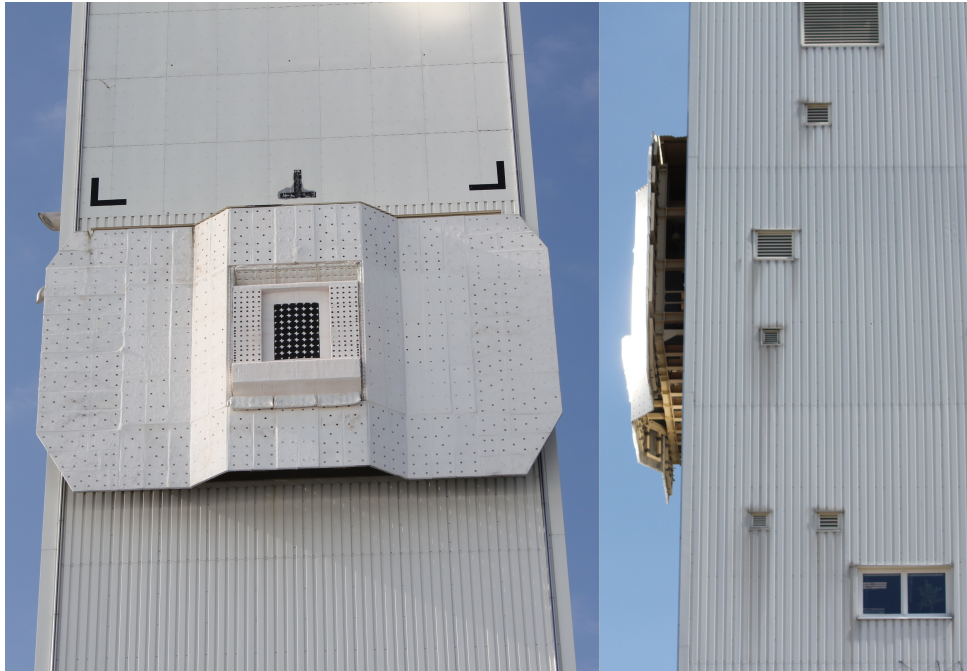


Abbildung 5.3.: Links ist die frontale Ansicht des Receivers auf der Forschungsebene dargestellt, rechts eine Seitenansicht, die etwa der späteren Messansicht entspricht.

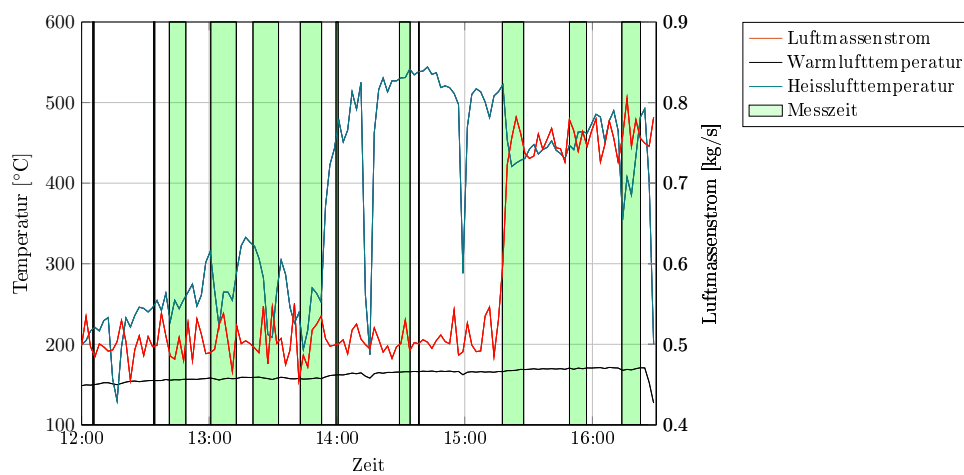


Abbildung 5.4.: Verlauf einiger Parameter am Messtag an der Forschungsebene.

5.2.1. Solarer Betrieb

Der Schwerpunkt der Messungen lag bei dem normalen Betrieb des STJ. Deshalb wurden an diesem Versuchstag die meisten Aufnahmen erstellt, nämlich über 300.000, die die Strömung in einem Zeitraum von ca. 90 Minuten wiedergeben. Die Aufnahmefrequenz variierte zwischen 40 und 80 Hz. Gemessen wurde an zwei Positionen, zum einen vor einem Trafohäuschen, im Folgenden Position Trafo, das etwa 100 m vom Solarturm entfernt war und zum anderen ungefähr von der Position, an der auch die Messungen an der Forschungsebene durchgeführt wurden, im Folgenden Position Mitte, die ca. 50 m vom Turm entfernt lag. Der Großteil der Messungen wurde an der Trafoposition durchgeführt (16 Messungen, ca. 75 Minuten), da hier der Receiver im Wesentlichen seitlich betrachtet wurde. Auf der Position Mitte wurde der Receiver frontaler gemessen. An diesem Versuchstag wurden auch mittels eines Massenspektrometers quantitative Messungen zur Rückführrate (vgl. [TRSH15]) durchgeführt. Deshalb sind zu einigen Aufnahmen auch die CO_2 -Konzentration in der Rückführluft verfügbar. Die Werte der Rückführrate werden in Zukunft verfügbar sein. Die Auswertung der Daten erfolgt jedoch noch. Die Heißlufttemperatur schwankte zwischen 250°C und 490°C , die Temperatur der Warmluft wies Schwankungen in einem Bereich von 125°C bis 200°C auf. Der Luftmassenstrom befand sich bei ca. 5 kg/s im Rahmen der Messungen. Der CO_2 -Gehalt lag im Wesentlichen zwischen 1000 und 1400 ppm. Diese Parameter sind ebenfalls in Abbildung 5.5 dargestellt. Der Versuchsaufbau wurde bereits in Abbildung 5.1 gezeigt. Die CO_2 -Eindüsung erfolgte hinter dem Gebläse, so dass die Annahme einer homogenen Verteilung nicht ohne Weiteres getroffen werden kann.

5.2.2. Gasbrennerbetrieb

Da bei dem ersten Versuch mit der CO_2 -Einleitung mittels einer Gasflasche nur eine geringe Konzentration erreicht werden konnte, wurde ein weiterer Versuch mit höherer Konzentration

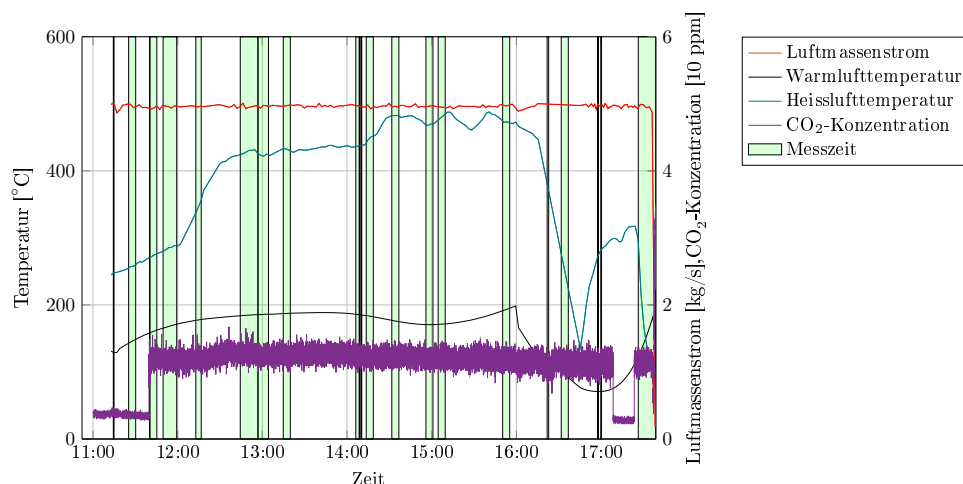


Abbildung 5.5.: Verlauf einiger Parameter am Messtag am Hauptreceiver, der solar bestrahlt wurde.

durchgeführt. Dies geschah im Rahmen einer Dichtheitsprüfung des Speichers, wobei Umgebungsluft durch den Receiver angesogen und zusammen mit Erdgas in einem Brenner verbrannt wurde. Das Abgas wurde in den Speicher geleitet und, nachdem es dort seine Energie an das Speichermaterial abgegeben hatte, in die Umgebung ausgeblasen. Abbildung 5.6 zeigt ein stark vereinfachtes Schema des Systems. Der Hauptteil des Abgases wurde über einen Kamin (linker Pfad nach dem linken Dreiwegeventil) und nur ein geringer Teil durch den Receiver (oberer Pfad) ausgeblasen. Die Ausblasung über den Receiver erfolgte, um die Struktur vorzuwärmen. Da das ausgeblasene Abgas zum Teil wieder eingesogen wird, konnte nur ein kleiner Teil des Abgases zur Vorwärmung verwendet werden, weil andernfalls keine vollständige Verbrennung im Brenner gewährleistet gewesen wäre.

Die Verbrennung des Erdgases (das im Folgenden durch Methan angenähert wird)¹ erfolgte mit einer Luftzahl von 1,1. Aus diesen Werten lässt sich die CO_2 -Konzentration des Abgases berechnen:

¹Nach Auskunft der Stadtwerke Jülich besteht das eingesetzte Erdgas zu etwa 98% aus Methan.

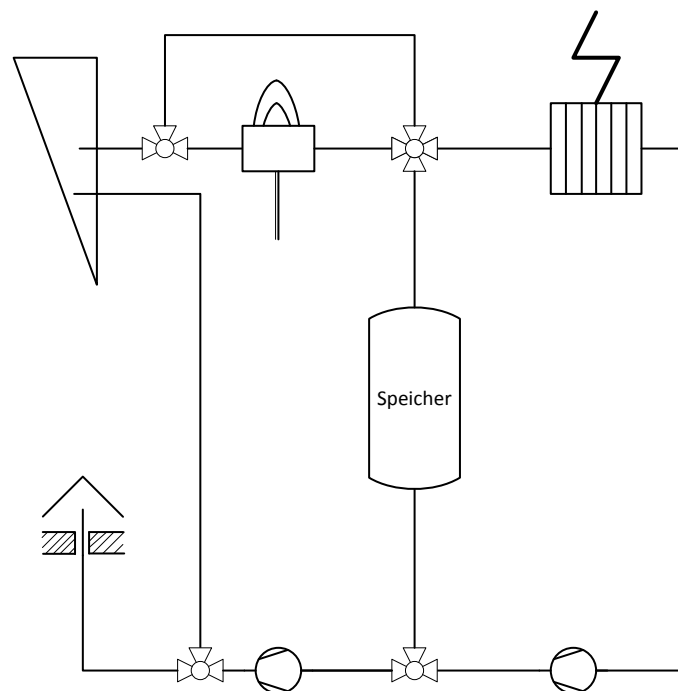


Abbildung 5.6.: Vereinfachtes Schema des Gasbrennerversuchs. Luft wird über den Receiver eingesogen, im Brenner mit Erdgas verbrannt und durch den Speicher geführt. Ein Teil wird wieder über den Receiver ausgeblasen, der Rest über einen Kamin. Zur Messung wurde der Bypass um den Gasbrenner benutzt.

$$CH_4 + \lambda \left(\frac{0,79}{0,21} N_2 + O_2 \right) \rightleftharpoons 2H_2O + CO_2 + \frac{0,79}{0,21} \lambda N_2 + (\lambda - 1) O_2 \quad (5.1)$$

$$\Rightarrow C_{CO_2} = \frac{1}{2 + 1 + \frac{0,79}{0,21} \lambda + (\lambda - 1)} \approx 14\%$$

Der Brennerbetrieb erfolgte für ca. 7,5 Minuten. Danach wurde der Brenner abgeschaltet und Umgebungsluft durch den Receiver angesogen, im Speicher erwärmt und ausgeblasen. Es wurden hierbei 3 Messungen von je 10 Minuten an den beiden Positionen des vorherigen Versuchs (zweimal Trafostation, einmal Feldmitte) durchgeführt, wobei 72.000 Einzelbilder aufgenommen wurden. Die Messungen starteten kurz vor dem Ausschalten des Brenners, so dass am Anfang der Messung von einem Abgas mit einer hohen CO_2 -Konzentration auszugehen ist. Im zeitlichen Verlauf nimmt die CO_2 -Konzentration immer weiter ab, da die Rückführung unvollständig ist und die Umgebungsluft nach und nach das Abgas ersetzt. Bei diesen Messungen wurden die Daten nicht kontinuierlich aufgezeichnet. Das Abgas wurde mit einer Temperatur von ca. 140°C bei einem Massenstrom zwischen 4 und 6 kg/s aus dem Speicher geleitet. Die gemessene Warmlufttemperatur betrug zwischen 40 und 60°C .

Es ist anzumerken, dass die angegebene Warmlufttemperatur nicht die Temperatur am Austritt des Receivers widerspiegelt. Die Temperaturmessung erfolgt vor dem Wärmeübergang zwischen der Warmluft und den Cups, so dass die angegebene Temperatur als untere Schranke gesehen werden kann, sofern der Receiver bestrahlt wird.

5.3. Messung am Kraftwerksschornstein

Die letzte Messung betraf ein nahegelegenes Kraftwerk, das mit Braunkohle befeuert wird. Die Messung wurde durchgeführt, da die Rauchgase eine deutlich höhere CO_2 -Konzentration als die Rückföhlrluft bei den Hauptmessungen aufweisen. Außerdem wurde über eine weit größere Entfernung gemessen. Die Temperatur des Rauchgases beträgt ca. 170°C . Die Zusammensetzung in Hinblick auf die Hauptkomponenten Wasser und CO_2 , konnten der Bertreiber nicht zur Verfügung stellen. Das Kraftwerk befindet sich in einer Entfernung von etwa 1,15 km zur Messposition. Es wurde je eine Messung mit CO_2 -Filter und ohne Filter über 30 Sekunden bei einer Bildrate von 80 Hz aufgenommen. In Abbildung 5.7 sind die Schornsteine des Kraftwerks dargestellt. Zu beachten ist, dass im sichtbaren Bereich nur der kondensierende Wasserdampf aus dem rechten Schornstein zu sehen ist.



Abbildung 5.7.: Abgebildet sind zwei Schornsteine des Braunkohlekraftwerks. Aus dem linken Schornstein wird, im visuellen nicht sichtbar, Rauchgas ausgeblasen, aus dem rechten Wasserdampf.

6. Auswertung

In diesem Kapitel wird die Auswertung der in Kapitel 5 gezeigten Aufnahmen beschrieben. Das prinzipielle Vorgehen wurde bereits in Kapitel 4 dargestellt. Allerdings wurden nicht alle Bilder in dieser Form ausgewertet, da das Verfahren relativ zeit- und rechenintensiv ist. Für die Erstellung eines Videos mit Subtraktion des dynamischen Hintergrundbildes werden alle Daten zweimal durchgegangen (zur Bestimmung des Maximums und Minimums, um den dynamischen Bildbereich zu finden, um zu jedem Videobild das Hintergrundbild zu erstellen und um dabei das Hintergrundbild abzuziehen und die Bilder in ein Video zu schreiben). Der V-BM3D Algorithmus benötigt auf dem eingesetzten Desktop-PC (64-bit, 8 GB Arbeitsspeicher, 3,1 GHz) ca. 2 Sekunden, um ein Bild zu glätten. Um alle Bilder zu glätten, wären demnach gut 11 Tage erforderlich. Die Aufnahmen wurden in einem ersten Schritt grob ausgewertet. Hierzu wurden statische Hintergrundbilder für Sequenzen von 300 Bildern erstellt und von den eigentlichen Bildern abgezogen. Danach wurde die dargestellte Intensität für sämtliche Bilder statisch gesetzt und danach wurden daraus Videos erstellt. Die Videos wurden daraufhin gesichtet und interessante Ausschnitte bzw. verhältnismäßig gut erkennbare Ausströmungen wie oben beschrieben feiner ausgewertet. Die im weiteren Verlauf gezeigten Abbildungen stammen alle aus der Feinauswertung. Die Auswertung der Strömungsbilder mittels des PIV-Algorithmus wird hier dem Ergebnisteil zugeordnet und im nächsten Kapitel beschrieben.

Die Darstellung der Abbildungen orientiert sich an dem vorherigen Kapitel. Zunächst werden die Bilder der Messung an der Forschungsebene gezeigt, danach die der Hauptmessung am Receiver mit solarer Einstrahlung und im Gasbrennerbetrieb. Abschließend sind die Aufnahmen der Messung am Braunkohlekraftwerk aufgeführt.

In den Aufnahmen an der Forschungsebene ist die Ausströmung deutlich erkennbar. Eine kurze Bildfolge ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Das hier gezeigte Strömungsprofil ist charakteristisch für die meisten Aufnahmen. Das Gas strömt zunächst überwiegend senkrecht zum Receiver aus, wird dann aber immer weiter nach oben abgelenkt. Weiterhin ist ein Abklingen der Strahlungsintensität vom Punkt der Ausströmung erkennbar. Auch wenn dieser Strömungsverlauf typisch für diesen Messtag war, traten Abweichungen von dieser Form auf, für die zwei Beispiele in Abbildung 6.2 gezeigt sind. Zum einen kann sich die Strömung weiter vom Turm entfernen, zum anderen auch nach unten abgelenkt werden.

Die Strömung an dem solar bestrahlten Receiver ist schlechter sichtbar als die an der Forschungsebene. In Abbildung 6.3 ist wieder eine typische Bildfolge von der Position des Trafos gegeben. Auch für den Fall des Hauptreceivers gilt, dass es Abweichungen von der typischen Strömungsform gibt. Allerdings ist hier das Signal sehr schwach, so dass die Bewegung zwar in einer Videosequenz verfolgbar, aber die Position des Gases auf Einzelbildern nicht vom Rauschen zu unterscheiden ist.

Von der Position Mitte lässt sich nur ein kleiner Teil der Ausströmung zeigen, da ein Großteil durch den Receiver im Hintergrund überstrahlt wird. Es sind ringförmige Schichten mit

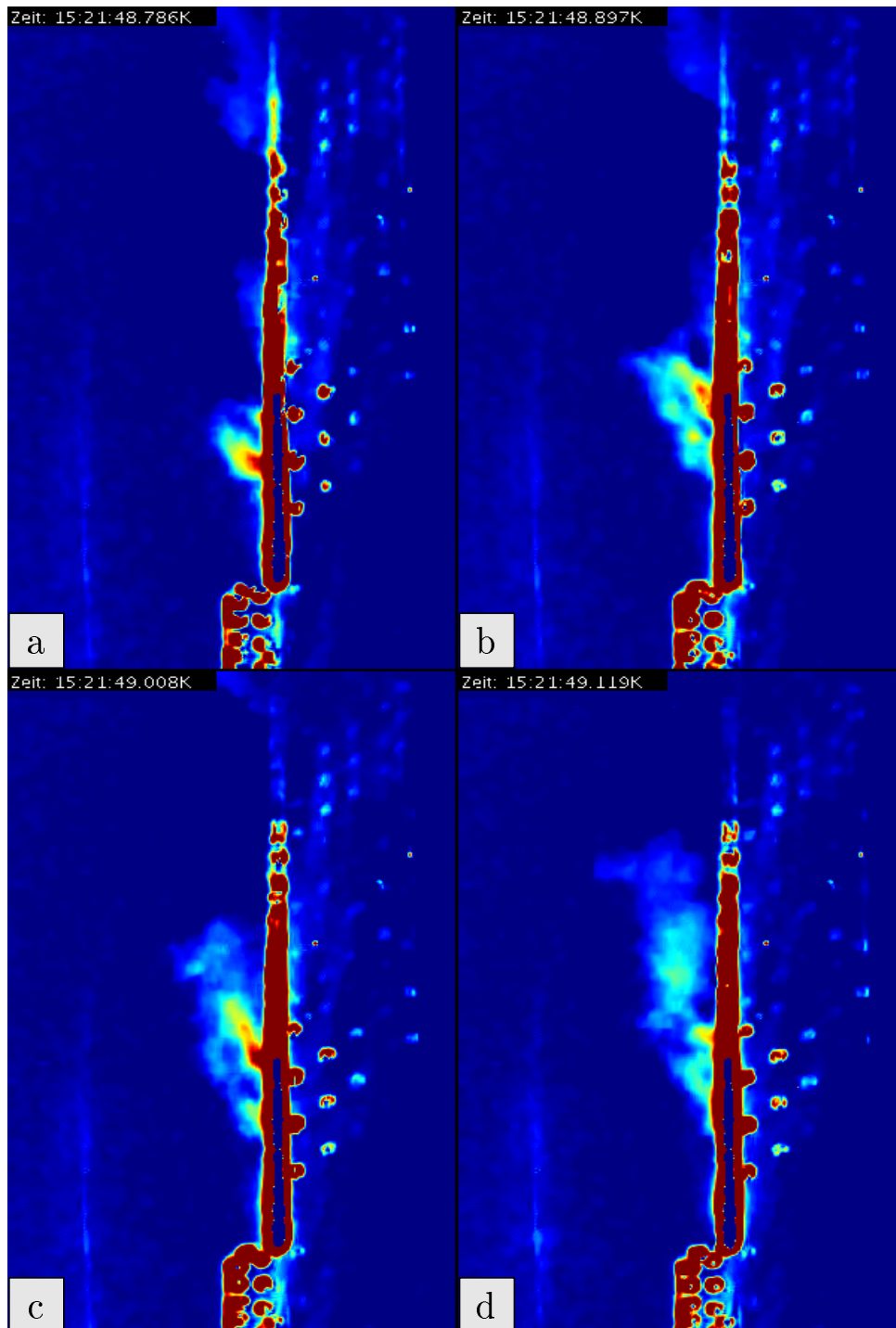


Abbildung 6.1.: Eine Bildfolge der Strömung aus dem Receiver der Forschungsebene. In Bild a beginnt eine Wolke normal zum Receiver auszuströmen, wobei eine leichte Bewegung nach oben erkennbar ist. In Bild b und c wird diese Aufwärtsbewegung deutlicher. In Bild d ist im oberen Teil keine Bewegung mehr normal zum Receiver erkennbar.

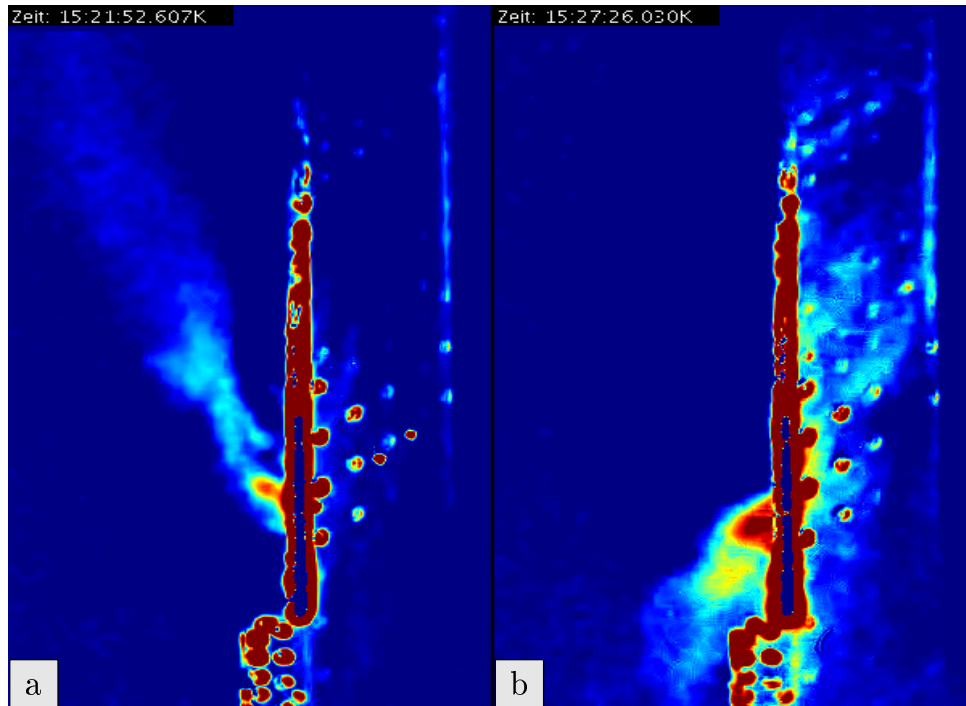


Abbildung 6.2.: Abweichungen von der typischen Strömungsform an der Forschungsebene. In Bild a entfernt sich die Strömung weiter vom Turm und verläuft etwa in einem Winkel von 60° zu einer Horizontalen durch den Ausströmpunkt. Bild c zeigt die Ablenkung der Strömung nach unten.

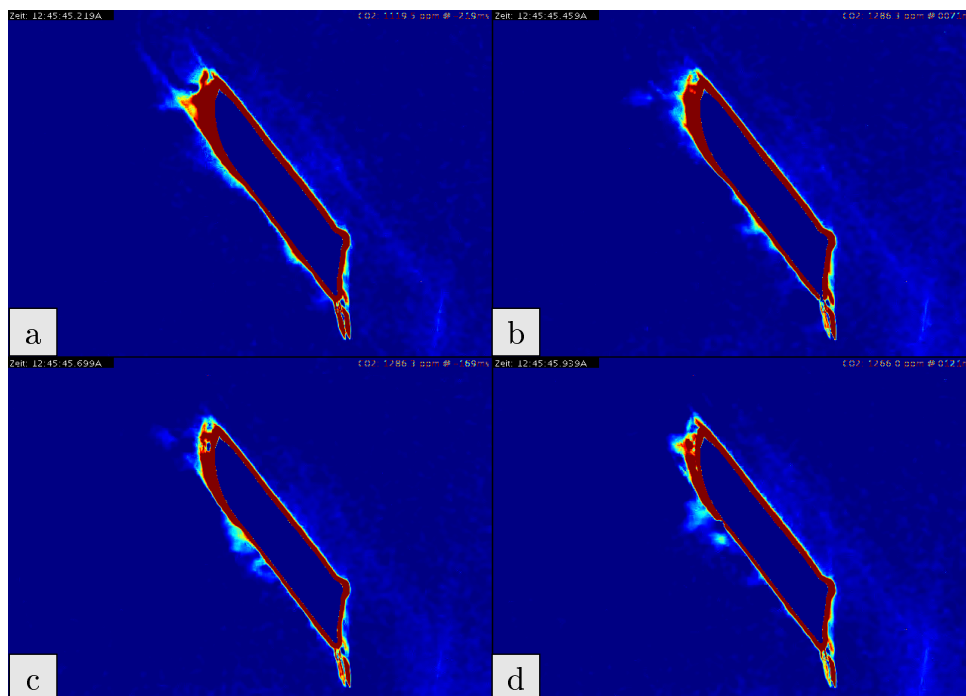


Abbildung 6.3.: Bildsequenz der Strömung aus dem Hauptreceiver. In Bild a lässt sich unten links am Receiver der Beginn der Ausströmung erkennen. In den folgenden Bildern b-d läuft die Strömung am Receiver nach oben, wobei sie sich senkrecht zum Receiver etwas ausbreitet.

unterschiedlicher Intensität erkennbar. Diese blieben auch nach der Mittelung über einen Bildbereich bestehen.

Bei der Messung im Gasbrennerbetrieb konnte die Strömung nicht visualisiert werden. Der Vollständigkeit halber soll allerdings auch hierfür Abbildung 6.5 gezeigt werden.

Abschließend wird die Messung an den Schornsteinen des Braunkohlekraftwerks in Abbildung 6.6 dargestellt¹. Bemerkenswert hierbei ist, dass die Aufnahme nicht durch den beschriebenen Auswertalgorithmus bearbeitet wurde, sondern die Strömung direkt erkennbar ist.

Diese Messung wurde sowohl mit CO_2 -Filter als auch ohne durchgeführt. Es ist anzumerken, dass aufgrund der Kalibrierdatensätze die Integrationszeit ohne Filter mit 2000 μs fast doppelt so groß wie die Integrationszeit mit Flammenfilter war. Ein Vergleich der beiden Aufnahmen befindet sich in Abbildung 6.7. In beiden Ausschnitten ist die Rauchgasströmung deutlich zu sehen. Ohne den Filter lassen sich noch weitere Strukturen, wie z.B. den Schornstein, erkennen. Der Filter bewirkt, dass nur das Rauchgas sichtbar ist, wobei sich dies deutlicher vom Hintergrund abhebt als in der Abbildung ohne Filter.

¹Es ist anzumerken, dass das Foto 5.7 nicht an dem Messtag aufgenommen wurde. Aus diesem Grund strömt der Dampf in eine andere Richtung als bei den IR-Aufnahmen

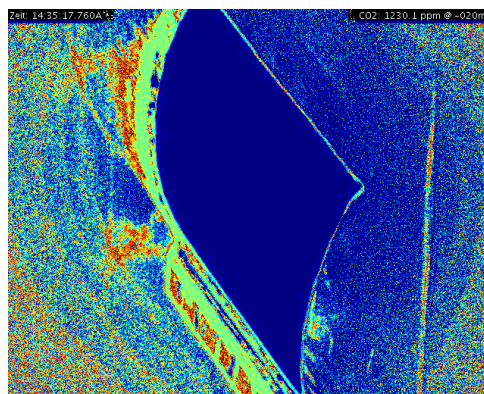


Abbildung 6.4.: Bild einer Messung von Position Mitte. Mittig links ist die Ausströmung erkennbar.

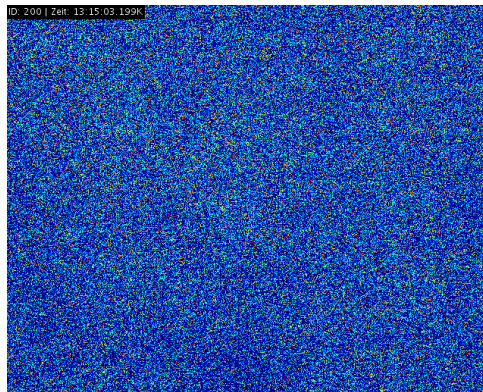


Abbildung 6.5.: Visualisierungsversuch der Strömung beim Gasbrennerbetrieb. Über den gesamten Messzeitraum von 30 Minuten ist nur Rauschen zu erkennen.

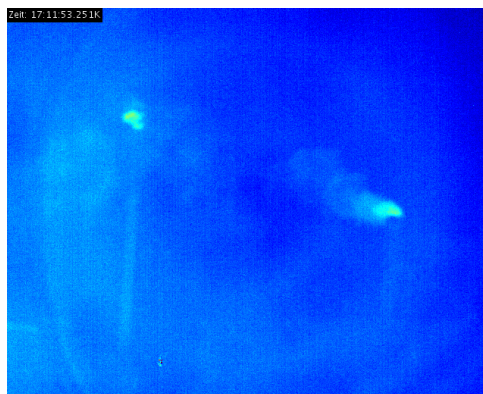


Abbildung 6.6.: Strömung des Rauchgases (links) und des Wasserdampfes (rechts) des Braunkohlekraftwerks.

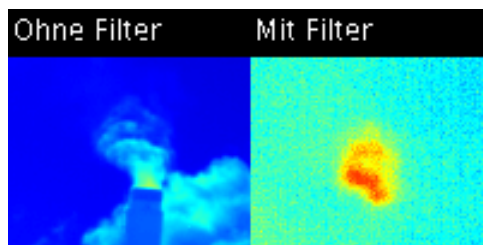


Abbildung 6.7.: Vergleich der Aufnahmen des Braunkohlekraftwerks ohne CO_2 -Filter (links) und mit Filter (rechts). Durch den Filter hebt sich die Strömung deutlicher vom Hintergrund ab, wobei das Rauchgas in beiden Fällen erkennbar ist.

7. Ergebnisse

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Auswertungsmethodik vorgestellt. Anschließend wird auf die Auswertung der Messungen eingegangen und abschließend das Resultat der Anwendung des PIV-Algorithmus gezeigt.

7.1. Auswertungsmethodik

Die einzelnen Schritte der Auswertung seien hier an einem Bild in Abbildung 7.1 gezeigt¹: Bei dem Rohbild überstrahlt der Receiver aufgrund der Festkörperstrahlung jegliche Gasstrahlung. Die Schritte der geometrischen Korrektur und Bildkalibrierung sind hier nicht gezeigt, da sie nur für Bildfolgen relevant sind. Nach Abzug des Minimalbildes und Anpassung des dargestellten Intensitätsbereichs, ist die Strömung deutlich zu erkennen. Aufgrund des hohen Kontrastes wird auch das Rauschen verstärkt, das im letzten Schritt geglättet wird.

Durch den Abzug eines (dynamischen) Minimalbildes können Artefakte in den Bildern entstehen. Dies ist in Abbildung 7.2 dargestellt. Das Artefakt ist dadurch entstanden, dass sich ein Objekt, z.B. eine Polle oder Staub, durch den Aufnahmebereich bewegt hat. Dabei wurde ein Teil der Strahlung absorbiert und somit weist dieser Bereich die minimale Intensität auf, die von den anderen Bildern abgezogen wird. Aus diesem Grund bleibt der Bereich für einige Aufnahmen, bis die Störung von dem Bereich des dynamischen Minimalbildes nicht mehr erfasst wird, als hellere Stelle zurück. Diese Artefakte entstehen prinzipiell nur vor dem Receiver, da die Gasströmung so schwach strahlt, dass sie auch von Objekten auf Umgebungstemperatur übertroffen wird. Dies behindert die Visualisierung der Gasströmung also nicht.

Die besten Glättungsergebnisse konnten bei den Testsequenzen mit dem V-BM3D Algorithmus erzielt werden. Der Wiener Filter lieferte bei einer Testsequenz mit wenig Rauschen nahezu identische Ergebnisse, doch bei der zweiten Sequenz mit einem schwächeren Signal war das Ergebnis deutlich schlechter als beim V-BM3D. Die besseren Resultate im Vergleich zu den anderen Filtern lassen sich daran erklären, dass der V-BM3D Filter Informationen aus mehreren Bildern sammelt und damit Rauschen besser erkennen und ausfiltern kann. Es sei angemerkt, dass dies nicht der einzige Filter ist, der sich auf Bildfolgen anwenden lässt. Sehr rechenintensive Methoden, wie zum Beispiel die Principle Component Analysis, PCA (bspw. [JLSX10]) wurden hier allerdings nicht berücksichtigt. Die Bilder zur Bewertung des V-BM3D Algorithmus sind in Abbildung 7.3 gezeigt. Die Gasströmung ist durch den Filter deutlich auszumachen, wobei wenig bis keine Informationen durch das Glätten verloren gehen. Dies ist daran zu sehen, dass im methodischen Rauschen, das ist das Ergebnis der Subtraktion des geglätteten Bildes vom Originalbild, keine Strukturen der Strömung erkennbar sind.

¹Es sei angemerkt, dass der Schritt des Image Enhancements mittels eines Falschfarbenbildes hier vorgezogen wurde, damit durch das Drucken der Arbeit, das aufgrund des Farbspektrums des Druckers auch eine Art Glätten ist, das Rauschen erkennbar bleibt.

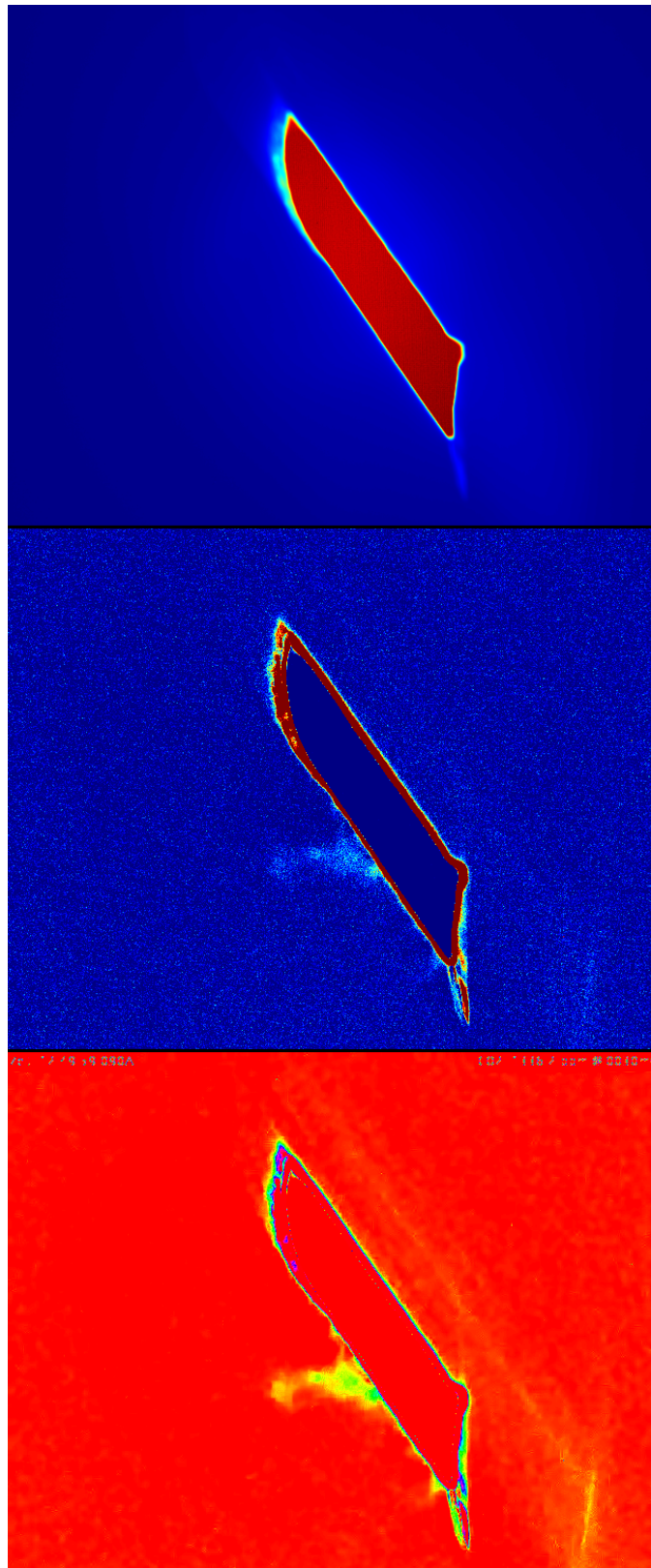


Abbildung 7.1.: Auswirkung der einzelnen Auswertungsschritte. Von oben nach unten: Rohbild, bei dem der Receiver alles andere überstrahlt, Abzug des Minimalbildes, bei dem zum ersten Mal die Strömung erkennbar wird, Glätten des Bildes

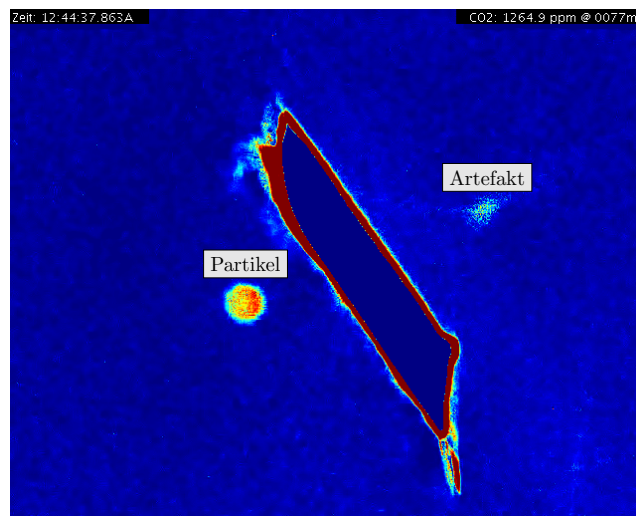


Abbildung 7.2.: Bildartefakt durch den Abzug des Minimalbildes. Bewegen sich kältere Objekte, z.B. Pollen, im Aufnahmebereich vor dem Receiver, bleibt dies auf den Bildern sichtbar, bis sich die Objekte nicht mehr in den Aufnahmen, die zur Bildung des dynamischen Minimalbildes benutzt werden, befinden.

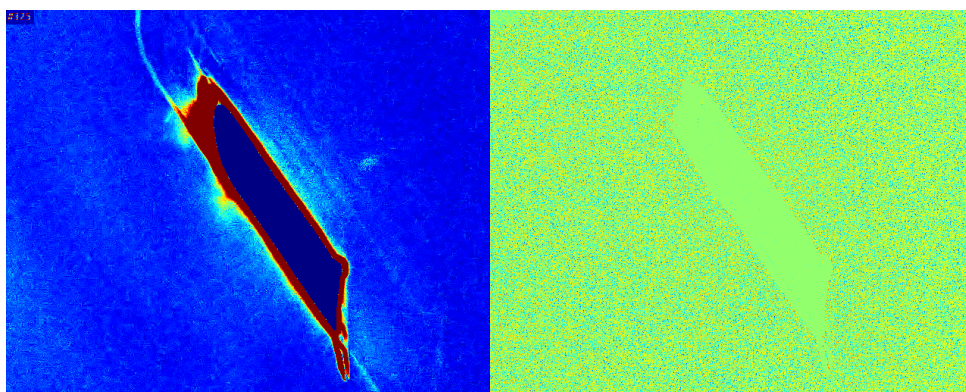


Abbildung 7.3.: Bewertungskriterien für den VBM3D-Algorithmus. Links die visuelle Qualität, wobei die Gasstrahlung deutlich erkennbar ist, rechts das methodische Rauschen. Hier sind im methodischen Rauschen keine Strömungsstrukturen mehr wahrzunehmen.

Das Bild des Receivers aufgenommen von der mittleren Position (Abbildung 6.4) zeigt ringförmige Bereiche unterschiedlicher Helligkeit um den Receiver. Diese stammen wahrscheinlich von Diskretisierungseffekten, da die Strahlungsintensität vom Receiver aus abfällt. Der Abzug des Minimalbildes löst das Problem nicht. Da hier die Emission des Tracergases betrachtet wurde, und diese Strahlung vor dem Receiver überstrahlt wird, wurde die Auswertungsmethodik vor allem für seitlich betrachtete Receiver optimiert. Die frontale Betrachtung eines heißen Receivers erfordert einen weiteren Korrekturterm zur Kompensation des Strahlungseinflusses.

7.2. Messungen

Bei der Strömung aus dem Receiver handelt es sich um eine turbulente Strömung. Der typische Verlauf, wie er in Abbildungen 6.1 und 6.3 dargestellt ist, zeigt eine deutliche Bewegung nach oben und die Strömung ist nahe am Receiver bzw. am Turm. Die Aufwärtsbewegung der Rückföhlruft wird durch die natürliche Konvektion durch den Temperaturunterschied zur Umgebungsluft induziert. Sofern Wind auftritt, kann die Strömung auch komplett umgekehrt werden, so dass die Rückföhlruft in Richtung Boden gedrückt wird, was in Abbildung 6.2b gezeigt ist.

Wie in Kapitel 3 gezeigt wurde, ist eine deutliche Abhängigkeit der Signalstärke von der Temperatur in den Aufnahmen erkennbar. So ist der Unterschied zwischen den Messungen am Receiver mit und ohne Bestrahlung im Wesentlichen auf die Temperatur der Rückföhlruft zurückzuführen. Im Gasbrennerbetrieb, also der Messung am unbestrahlten Receiver, ist die CO_2 -Konzentration ca. zehnmal höher als am bestrahlten Receiver. Dennoch ist die Strömung nur im letzteren Fall erkennbar, da hier die Temperatur etwa $100^\circ C$ höher ist.

Dass die Strömung am Hauptreceiver schlechter erkennbar ist als an der Forschungsebene, kann mehrere Gründe haben. Naheliegend ist, dass durch die größere Entfernung zum Messobjekt bei der Messung am Hauptreceiver ein größerer Anteil der Strahlung auf dem Weg durch die Atmosphäre abgeschwächt wird. Weiterhin wies die Rückföhlruft bei der Messung an der Forschungsebene wahrscheinlich eine höhere CO_2 -Konzentration auf. In beiden Fällen wurde das CO_2 über die gleiche voll geöffnete Gasflasche eingedüst, jedoch betrug der Luftmassenstrom in der Forschungsebene nur etwa 10 % von dem Luftmassenstrom am Hauptreceiver. Dass die Zugabe der gleichen Menge CO_2 bei einem geringeren Luftmassenstrom zu einer höheren Konzentration führt als bei einem höheren Luftmassenstrom, ist plausibel. Zwar ist die Konzentration weiterhin noch abhängig von der Lufrückföhlrate, die bisher für beide Fälle noch nicht bekannt ist, allerdings wird sich diese in beiden Fällen auf einem ähnlichen Niveau befinden. Am Tag der Messung am Hauptreceiver herrschte ein stärkerer Wind als bei der Messung an der Forschungsebene. Weiterhin ist die Geometrie des Hauptreceivers anders als die des Receivers auf der Forschungsebene. Der Hauptreceiver ist nach außen gewölbt, wohingegen der Receiver auf der Forschungsebene gerade ist. Da die emittierte Gasstrahlung vor dem Receiver nicht erkennbar ist, konnte der Hauptreceiver nur schräg beobachtet werden.

Hierdurch ist die Länge, auf der das CO_2 detektiert wird, verhältnismäßig kleiner als bei der Messung an der Forschungsebene. Dies ist in Abbildung 7.4 veranschaulicht. Ein gewölbter Receiver weist immer einen Bereich auf, in dem die Ausströmung nicht von der Kamera erfasst werden kann. Darüber hinaus wird nur ein Teil der Strömung unbeeinflusst detektiert. Teilt man den Receiver in der Abbildung in eine obere und untere Hälfte, wird der Teil der Strömung aus der unteren Hälfte direkt beobachtet. In der oberen Hälfte ist die Ausströmung nicht direkt sichtbar (roter Bereich). Durch die Interaktion mit der Umgebungsluft nimmt zum einen die Konzentration und zum anderen die Temperatur des Tracergases über die Entfernung von dem Receiver ab, so dass die Intensität der Strahlung des Gases, das aus einem roten Bereich in eine grünen wechselt, im Vergleich zur Strahlung von Gas, das direkt in einem grünen Bereich ausströmt, kleiner ist.

Die Messung an dem Braunkohlekraftwerk zeigt, dass die Infrarotthermographie von Gasströmungen generell auch über größere Entfernungen anwendbar ist. Die Temperatur des Rauchgases liegt mit etwa 180°C auf einem ähnlichen Niveau wie die der Rückföhlruft, so dass der wesentliche Unterschied zur Messung am Receiver in der CO_2 -Konzentration liegt. CO_2 ist der Hauptbestandteil der Verbrennung von Braunkohlebriketts, die vom Kraftwerksbetreiber eingesetzt wurden. Diese Messung zeigt, dass die Konzentration ein wichtiger Einflussparameter ist, allerdings kann diese nicht beliebig gesteigert werden, da in der IIT das Tracergas nur in geringen Konzentrationen beigegeben werden wird.

Der Vergleich der Messung mit und ohne CO_2 -Filter zeigt, dass der Einsatz des Filters hier gerechtfertigt ist und das Signal deutlich hervorhebt.

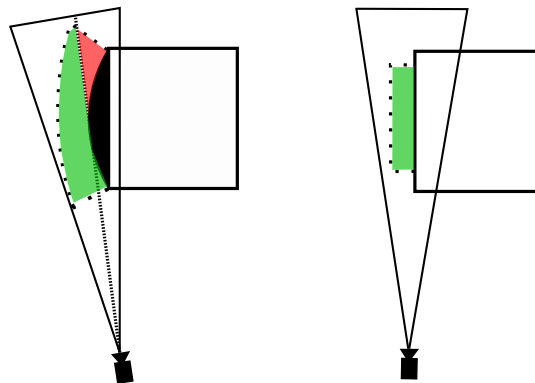


Abbildung 7.4.: Vergleich der Receivergeometrien. Links ein nach außen gewölbter Receiver wie der Hauptreceiver des STJ, rechts ein flacher Receiver wie auf der Forschungsebene. In grün ist jeweils der Bereich der Ausströmung dargestellt, der von der Kamera detektiert werden kann. Rote Bereiche können von der Kamera nicht gesehen werden. Bei flachen Receivern ist die gesamte Ausströmung sichtbar, bei gewölbten Receivern ist ein Teil der Ausströmung verdeckt.

7.3. Anwendung des PIV Algorithmus

Wendet man auf visualisierte Strömung einen PIV-Algorithmus an, lassen sich Geschwindigkeitsfelder erstellen. Dies ist exemplarisch in Abbildung 7.5 dargestellt. Es ist anzumerken, dass der Algorithmus bei diesen Daten relativ fehleranfällig ist und hinreichend gute Ergebnisse nur durch eine Mittelung über hunderte Bilder erhalten werden können. Da die Strömung turbulent ist und einige Bereiche zeitweise nicht durchströmt werden, ist diese Mittelung mit einem systematischen Fehler zu kleineren Geschwindigkeiten versehen. Die hier gezeigten Geschwindigkeitsfelder sollen eher die Anwendbarkeit des PIV-Algorithmus auf die mittels IIT gewonnen Daten zeigen, als quantitative Aussagen abzuleiten.

Mit dieser Einschränkung sollen einige Auffälligkeiten der Geschwindigkeitsfelder dargestellt werden. Bemerkenswert hierbei ist, dass im Mittelwert keine Strömungskomponente wieder zum Receiver führt. Daraus ließe sich schließen, dass die Rückföhlruft nicht mehr zurückgewonnen werden kann, sobald diese ein Stück weit vom Receiver entfernt ist. Die eigentliche Luftrückföhrung findet nahe am Receiver statt und kann in den hier aufgenommenen Daten nicht gesehen werden. Die Geschwindigkeitsvektoren zeigen eine deutliche Aufwärtsrichtung. Dies kann durch den Auftrieb, der durch die Temperaturdifferenz der Rückföhlruft zur Umgebung verursacht wird, erklärt werden.

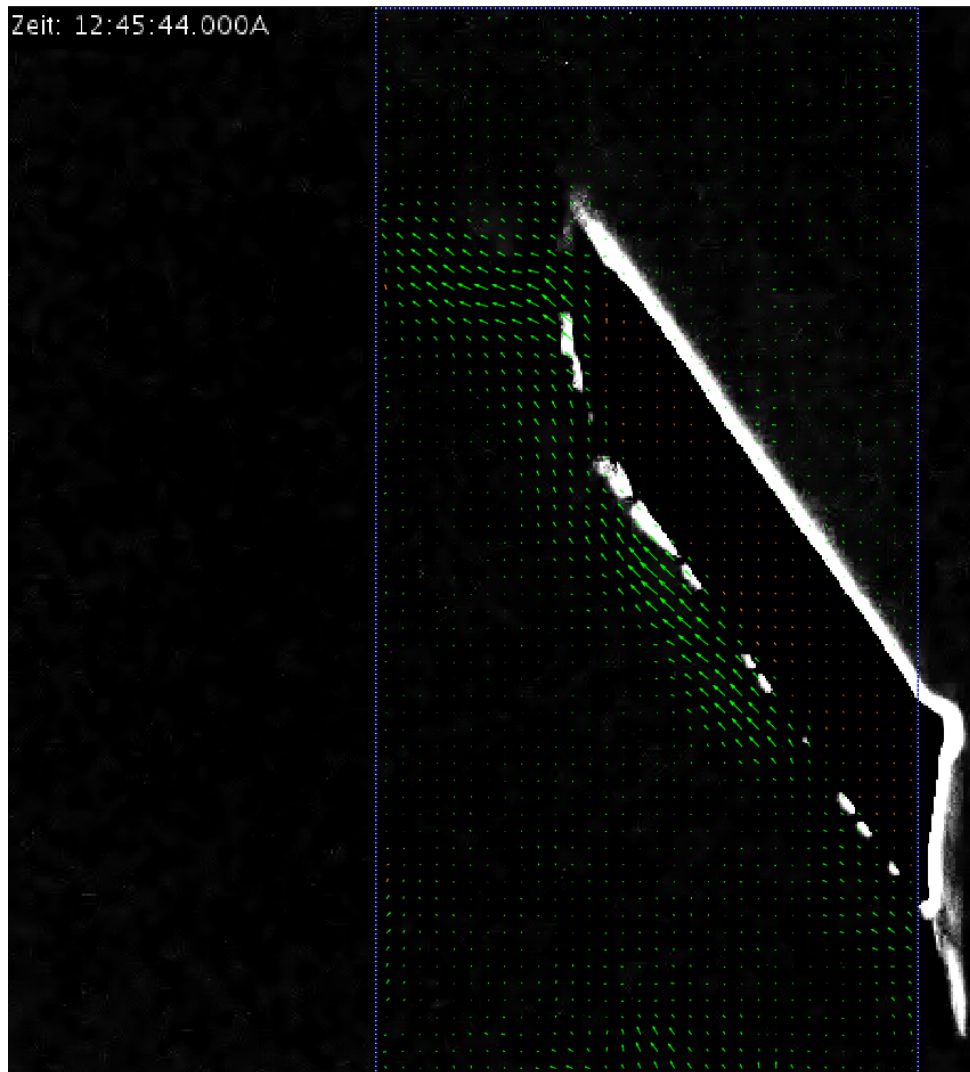


Abbildung 7.5.: Ergebnis des PIV-Algorithmus an Messdaten des Hauptreceivers. Die mittleren Geschwindigkeiten streuen in einem Berich von ca 1 bis 2,4 m/s.

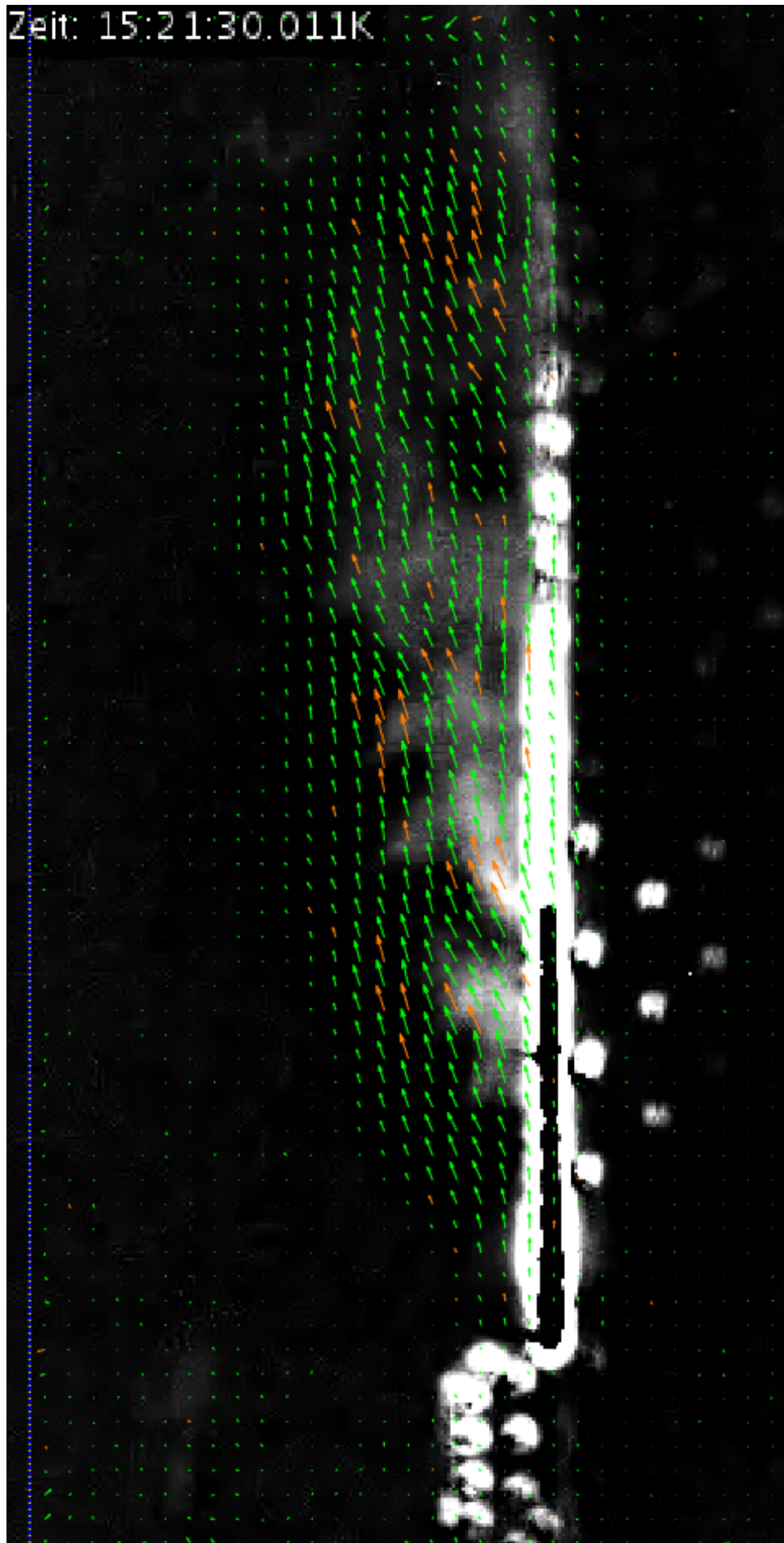


Abbildung 7.6.: Ergebnis des PIV-Algorithmus an Messdaten der Forschungsebene. Die Geschwindigkeiten liegen etwa im Bereich von 0,7 bis 2,5 m/s

8. Einschränkungen der IIT

Wie jedes Verfahren, weist auch die IIT Schwächen auf, die hier dargestellt werden sollen. Die Temperaturabhängigkeit der Signalstärke stellt eine Einschränkung für das Verfahren dar. Ist die Gasströmung auf niedrige Temperaturen begrenzt, lässt sich die IIT evtl. nicht anwenden oder ist auf kurze Abstände zum Messobjekt angewiesen. Bspw. war die Temperatur der Warmluft beim STJ durch eine Temperaturbeschränkung von Klappen im Strömungsweg auf ca. 200°C begrenzt.

Das Messverfahren integriert die Strahlung über die Sichtlinie. Im Gegensatz z.B. zum PIV-Verfahren kann hierdurch nicht die Strömung in einer Ebene dargestellt werden. Bei stark turbulenten Strömungen schränkt dies die Aussagekraft der Ergebnisse deutlich ein.

Der hier eingesetzte Tracer (CO_2) weist eine klimaschädliche Wirkung auf. Allerdings ist das Global Warming Potential (GWP) des CO_2 mit eins relativ gering. Außerdem wird der Tracer nur kurzfristig und in kleinen Mengen eingesetzt, so dass diese Wirkung vernachlässigt werden kann.

Das Verfahren ist prinzipiell dazu geeignet, Messungen im größeren Maßstab durchzuführen. Allerdings liegt derzeit hierin auch eine Schwäche des Verfahrens. Die Auflösung bzw. die Pixelzahl heutiger Infrarotkameras ist verglichen mit CCD-Kameras deutlich geringer. Wie fein ein Objekt aufgelöst werden kann, hängt von der eingesetzten Optik, der Entfernung und der Detektorgröße ab, wobei letztere vereinfacht durch die Pixelzahl charakterisiert ist. Abbildung 8.1 zeigt die Abbildung eines Gegenstandes über eine Linse auf einer Bildebene, dem Detektor. Wie groß der Bereich ist, den ein Detektorpixel vom Gegenstand abbildet, kann über folgende Gleichung berechnet werden:

$$G = B \cdot \left(\frac{g}{f} - 1 \right) \quad (8.1)$$

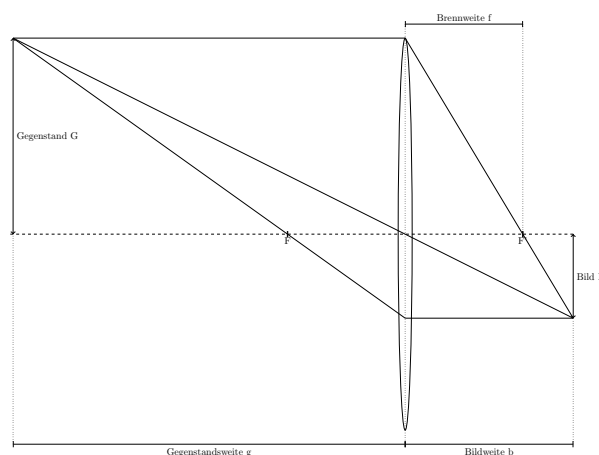


Abbildung 8.1.: Vereinfachter Strahlengang bei der Abbildung eines Gegenstandes

Die Größe eines Detektors (B) der eingesetzten Kamera beträgt $15\text{ }\mu\text{m} \times 15\text{ }\mu\text{m}$. Weiterhin wurde ein Teleobjektiv mit Brennweite (f) von 100 mm für die Messungen benutzt. Die Entfernung (g) zwischen Messobjekt und Kamera betrug bei der Messung am Hauptreceiver ca. 114 m und an der Forschungsebene ca. 56 m. Die Kamera verfügte über eine Auflösung von 640×512 Pixeln. Hieraus ergeben sich Pixelgrößen von ca. 1,7 cm im Fall des Hauptreceivers und 0,8 cm bei der Messung an der Forschungsebene. Diese Werte sind ebenfalls in Tabelle 8.1 aufgelistet.

Die Genauigkeit von Kameras im sichtbaren Bereich, z.B. beim BOS-Verfahren, kann hierdurch nicht erreicht werden. Weiterhin ergeben sich schnell signifikante Fehler, sofern bspw. durch das Glätten Randbereiche abgeschnitten werden.

Das wahrscheinlich größte Hindernis bei der IIT sind die Kosten einer IR-Kamera. Der apparative Aufwand zur Durchführung einer IIT ist vergleichbar mit dem Aufbau einer BOS-Messung, bei der ein natürlicher Hintergrund verwendet wird. Allerdings sind die Kosten für die Anschaffung einer Kamera im Infrarotbereich um ein Vielfaches höher als für eine Kamera im sichtbaren Bereich. Sofern sich die Kosten für IR-Kameras zukünftig nicht stark reduzieren, wird das IIT auf Spezialanwendungen beschränkt bleiben.

Tabelle 8.1.: Berechnungen zur Abbildung der IR-Kamera

Messung	Entfernung [m]	Pixelgröße [mm]	Bildgröße [m]
Hauptreceiver	~114	17,085	$10,934 \times 8,7485$
Forschungsebene	~56	8,385	$5,3664 \times 4,2931$

9. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren vorgestellt, mit dem es prinzipiell einfach ist, die Strömung von offenen volumetrischen Receivern zu visualisieren. Dies ist mit anderen Messverfahren nicht möglich, was in Kapitel 2 gezeigt wurde. Auch wenn dieses Verfahren unabhängig entwickelt wurde, liegen die zeitlichen Ursprünge deutlich vor dieser Arbeit. Allerdings sind diese Ansätze nicht über den Labormaßstab hinaus betrieben worden und die hier durchgeführten Messungen sind die ersten in einem größeren Maßstab. Die Induced Infrared Thermography beruht darauf, dass Gase Strahlung in gewissen Bereichen emittieren und absorbieren. Durch die Absorption von Gasen in der Atmosphäre gibt es Wellenlängenbereiche, in der keine Solarstrahlung über die gesamte Atmosphäre transmittiert wird. Soll Strahlung in diesem Bereich detektiert werden, kann dies sogar mit der Atmosphäre im Hintergrund erfolgen. Bei der IIT wird einer Gasströmung ein Tracer hinzugefügt, der dafür ursächlich ist, dass die Strömung nach Zugabe Infraroteigenschaften in einem Bereich aufweist, der zuvor nicht aktiv war. Durch die Temperatur der Gasströmung emittiert der Tracer Strahlung, die mittels einer Infrarotkamera detektiert werden kann. Die Menge der emittierten Strahlung hängt im Wesentlichen von der Gastemperatur, aber auch von der Konzentration, dem Druck und der Länge des Gases ab. Diese Zusammenhänge und die Schwächung durch die Atmosphäre sind in Kapitel 3 erläutert. Aufgrund der Extinktion auf dem Weg durch die Atmosphäre können nur schwache Signale detektiert werden. In Kapitel 4 wird gezeigt, wie man trotzdem die Signale weitgehend isolieren kann. Dies erfolgt über die Subtraktion eines dynamischen Minimalbildes, die Anpassung des dargestellten Intensitätsbereichs und die Glättung der Bilder mittels des VBM3D-Algorithmus. Die hier durchgeführten Messungen (Kapitel 5 und 6) visualisieren zum ersten Mal die Strömungsverhältnisse vor einem offenen volumetrischen Receiver. Diese Strömung ist turbulent und durch die natürliche Konvektion dominiert. Allerdings können Windeinflüsse auch dazu führen, dass der Strömungsverlauf umgekehrt wird (Kapitel 7).

Das IIT in der jetzigen Form bietet noch Verbesserungspotenzial und weitere Möglichkeiten, die im Folgenden skizziert werden:

Bisher wurde nur die Emission von dem Gas betrachtet und der Receiver möglichst nicht in dem Bild erfasst. Da nach dem Kirchhoffschen Gesetz spektrale Emission gleich spektraler Absorption ist, kann sich auch die Strömung vor dem Receiver beobachten lassen. Hierzu ist der Receiver als Hintergrund und eine kurze Integrationszeit zu wählen. Durch die Absorption der Festkörperstrahlung des Receivers erscheinen Bereiche, in denen CO_2 ausströmt, dunkler. Durch den Einsatz von trainierten Filtern lässt sich möglicherweise eine Echtzeitanwendung realisieren. Hierbei werden die Filter offline mit Messdaten trainiert und die Filterkoeffizienten in Tabellen hinterlegt. In der Anwendung müssen die Koeffizienten dann nicht mehr berechnet werden, sondern werden lediglich in der Tabelle nachgeschlagen. Weiterhin könnte der Einsatz von lernenden Filtern die Auswertung bzw. die Glättung verbessern. [SYLL14]

Werden mehrere Infrarotkameras eingesetzt, lässt sich die Strömung räumlich visualisieren bzw. lassen sich die Geschwindigkeiten bestimmen. Dies würde ähnlich wie die Auswertung eines Computertomographen erfolgen.

Es können andere Tracer als CO_2 eingesetzt werden, wobei CO_2 einen sehr hohen Absorptionskoeffizienten aufweist (den höchsten der in HITRAN tabellierten Moleküle). Wasser weist bspw. starke Infraroteigenschaften auf. So kann die Rückführluft durch Dampfzugabe gesättigt und die Abstrahlung des Wassers detektiert werden. Durch andere Tracermoleküle ist der Einsatz von günstigeren LWIR-Kameras möglich.

Weiterhin gibt es mehrere Möglichkeiten, die Signalstärke in der Anwendung zu erhöhen bzw. lässt sich die IIT zur Visualisierung der Luftrückführung bei weiteren Anwendungen benutzen. Zunächst lässt sich die CO_2 -Konzentration bei den hier durchgeführten Messungen leicht durch die Verwendung mehrerer Gasflaschen erhöhen. Dies führt zu einer größeren Signalstärke und folglich zu einer leichteren Visualisierung. Weiterhin können die Druckminderer beheizt werden, so dass die Gasleitungen nicht vereisen und dadurch evtl. mehr CO_2 in den Luftweg gelangt. Das CO_2 an sich lässt sich beheizen und evtl. kurz vor dem Receiver eindüsen, so dass die Temperaturbeschränkung durch die Klappen im Warmluftweg von $200^\circ C$ nicht eingehalten werden muss.

Da zukünftig neben dem STJ ein weiterer Multifokusturm errichtet wird, lassen sich die Messungen aus erhöhten Blickwinkeln wiederholen. Je nach Höhe des Multifokusturms können sogar BOS-Messungen mit natürlichem Hintergrund möglich werden. Falls sich die Anwendung offener volumetrischer Receiver verbreitet, können Anwendungen mit höheren Warmlufttemperaturen entstehen. Von Storch et al. [vSSRH15] haben bspw. einen Prozess zur Erdgasreformierung vorgeschlagen, bei dem die Warmluft mit ca. $300^\circ C$ ausgeblasen wird. Wie vorher gezeigt wurde, erhöht sich durch höhere Temperaturen die Gasstrahlung signifikant.

Bei einem bekannten Strömungsfeld und bekannter Tracerkonzentration lässt sich mit der IIT die Tracertemperatur bestimmen, sofern andere Strahlungseinflüsse bspw. durch Abzug eines ungestörten Referenzbildes eliminiert werden können. Durch die erstellten Geschwindigkeitsfelder kann ebenfalls die Temperatur abgeschätzt werden. Die Auftriebskraft bewirkt eine Beschleunigung des Gases nach oben, bis die Reibung mit der Luft diese Kraft kompensiert. Sofern bei der Ausströmung noch keine Aufwärtsgeschwindigkeit besteht, lässt sich über die Beschleunigung auf die Dichte und damit auf die Temperatur schließen. Bei bekannter Konzentration kann dann mittels der IIT die Ausströmbreite bestimmt werden.

Mit den quantitativen Werten zur Luftrückführrate, die von Tiddens et al. [TRSH15] bestimmt wird, kann man eine Heuristik entwickeln, die aus der Signalstärke oder der sichtbaren Ausströmfläche auf die Rückführrate schließt.

Die IIT kann dazu dienen, numerische Berechnungen zu validieren. Hier wurde ein ähnliches Strömungsverhalten wie bei der Simulation von 4 Absorbercups beobachtet [MQ15], allerdings konnten die Ergebnisse weder verifiziert noch falsifiziert werden. Zum einen ist die Datenmenge

der Geschwindigkeitsfelder in dieser Arbeit zu gering um quantitative Aussagen zu treffen, zum anderen wurden die Messungen hier auf weit größeren Skalen durchgeführt.

Weitere Messungen mit höheren Temperaturen oder Tracerkonzentrationen sind wünschenswert. Mit weiteren Daten lässt sich der Einfluss des Windes besser abschätzen und die ungestörte Strömung besser verstehen. Dies kann zu verbesserten Designs der Receiver führen, was letztendlich die Luftrückführrate und damit den Wirkungsgrad dieser Art von Solartürmen erhöht.

Anhang

A. Zusammensetzung trockener Luft

Tabelle A.1.: Zusammensetzung der trockenen Luft nach Vollmer[VM10, S. 53]

Gas	Symbol	Volumen-%	Konzentration (ppm)	Anteil häufigstes Isotop [#HITRAN2015]
Stickstoff	N_2	78,08	-	99,27% [$^{14}N_2$]
Sauerstoff	O_2	20,95	-	99,53% [$^{16}O_2$]
Argon	Ar	0,93	-	-
Kohlenstoffdioxid	CO_2	0,0388	388	98,42% [$^{12}C^{16}O$]
Neon	Ne	0,0018	18	-
Helium	He	0,0005	5	-
Methan	CH_4	0,00018	1,8	98,88% [$^{12}C^1H_4$]
Wasserdampf	H_2O	variabel	variabel	99,73% [$^1H_2^{16}O$]

B. Daten zur Kamera

2.3 Technische Daten

Modell	ImageIR® 5100	ImageIR® 5300	ImageIR® 5800	ImageIR® 8300	ImageIR® 8800
Spektralbereich	(0,8 ... 2,5) µm	(2 ... 5) µm	(8 ... 9,3) µm	(2 ... 5) µm	(8 ... 12) µm
Bildformat	(320 x 256)	(320 x 256)	(320 x 256)	(640 x 512)	(640 x 512)
Detektor	MCT	MCT oder InSb	MCT oder QWIP	MCT oder InSb	MCT oder QWIP
Detektorkühlung	thermoelektrisch	Stirlingkühler	Stirlingkühler	Stirlingkühler	Stirlingkühler
Temperaturauflösung	–	0,025 K @ 30 °C	0,025 K @ 30 °C	0,025 K @ 30 °C	0,025 K @ 30 °C
Temperaturmessbereich	–	(-40 ... 1.200) °C (optional bis 2.000 °C)			
Lagertemperatur	(-40 ... 70) °C	(-40 ... 70) °C	(-40 ... 70) °C	(-40 ... 70) °C	(-40 ... 70) °C
Betriebs-temperatur	(-20 ... 50) °C	(-20 ... 50) °C	(-20 ... 50) °C	(-20 ... 50) °C	(-20 ... 50) °C
Dynamikbereich	14 bit	14 bit	14 bit	14 bit	14 bit
Fenstermodus	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Bildrate (Vollbild/ Halbbild/Viertelbild)	(1 ... 100) Hz/-/-	bis 250/900/3.000 Hz optional: 10.000 Hz Zeile		bis 100/325/850 Hz optional: 2.000 Hz Zeile	
Schutzgrad	IP 54, IEC 529	IP 54, IEC 529	IP 54, IEC 529	IP 54, IEC 529	IP 54, IEC 529
Digital-Interface Option	GigE CAMLink, USB	GigE CAMLink, USB	GigE CAMLink, USB	GigE CAMLink, USB	GigE CAMLink, USB
Gewicht ohne Objektiv	3 kg	3 kg	3,5 kg	3 kg	3,5 kg

Tab. 1: Technische Daten der Kameraserie ImageIR®

2.4 Objektive

Typ	Brennweite (mm)	Verfügbarkeit
Weitwinkelobjektiv	12	ImageIR® 5300, 5800, 8300, 8800
Normalobjektiv	25	ImageIR® 5300, 5800, 8300, 8800
Teleobjektiv	50	ImageIR® 5300, 5800, 8300, 8800
Teleobjektiv	100	ImageIR® 5300, 5800, 8300, 8800
Close-Up 500 mm für Teleobjektiv 100 mm		ImageIR® 5300, 8300
Close-Up 1.000 mm für Teleobjektiv 100 mm		ImageIR® 5300, 8300
Mikroskopobjektiv M = 1,0x		ImageIR® 5300, 8300
Mikroskopobjektiv M = 2,5x		ImageIR® 5300, 8300

Tab. 2: Wechselobjektive der Kameraserie ImageIR®

Abbildung B.1.: Kameraeigenschaften

Infrarot-Thermografiekamera ImageIR®
2. Kamerabeschreibung

InfraTec

Optik	Brennweite (mm)	min. Fokus (m)	FOV (°)	ImageIR® 5300 IFOV (mrad)	ImageIR® 8300 IFOV (mrad)
Weitwinkelobjektiv	12	0,2	42,0 x 34,2	2,4	1,2
Normalobjektiv	25	0,4	21,7 x 17,5	1,2	0,6
Teleobjektiv 1	50	1,0	11,0 x 8,8	0,6	0,3
Teleobjektiv 2	100	1,5	5,5 x 4,4	0,3	0,15
Makro	Brennweite (mm)	Fokus (mm)	Bildfeld (mm)	Auflösung (µm)	Auflösung (µm)
Close-Up 500 mm	für Teleobjektiv 100 mm	500	48 x 39	150	75
Close-Up 1.000 mm	für Teleobjektiv 100 mm	1.000	96 x 77	300	150
Mikroskop M = 1,0x	-	195	25	30	15
Mikroskop M = 2,5x	-	21		12	6

Tab. 3: Parameter für MWIR-Wechselobjektive

Optik	Brennweite (mm)	min. Fokus (m)	ImageIR® 5800 FOV (°)	ImageIR® 5800 FOV (°)	ImageIR® 5800 IFOV (mrad)	ImageIR® 8800 IFOV (mrad)
Weitwinkelobjektiv	13	0,05	40,5 x 32,9	43,0 x 35,0	2,3	1,2
Normalobjektiv	25	0,2	21,7 x 17,5	23,1 x 18,6	1,2	0,6
Teleobjektiv 1	50	0,5	11,0 x 8,8	11,7 x 9,4	0,6	0,3
Teleobjektiv 2	75	3,0	7,3 x 5,9	7,8 x 6,3	0,3	0,2
Teleobjektiv 3	100	1,5	5,5 x 4,4	5,9 x 4,7	0,2	0,16

Tab. 4: Parameter für LWIR-Wechselobjektive



Abb. 6 ImageIR® mit Objektivauswahl

Abbildung B.2.: Kameraeigenschaften
(fortgesetzt)[Inf10]

C. Daten zum Filter

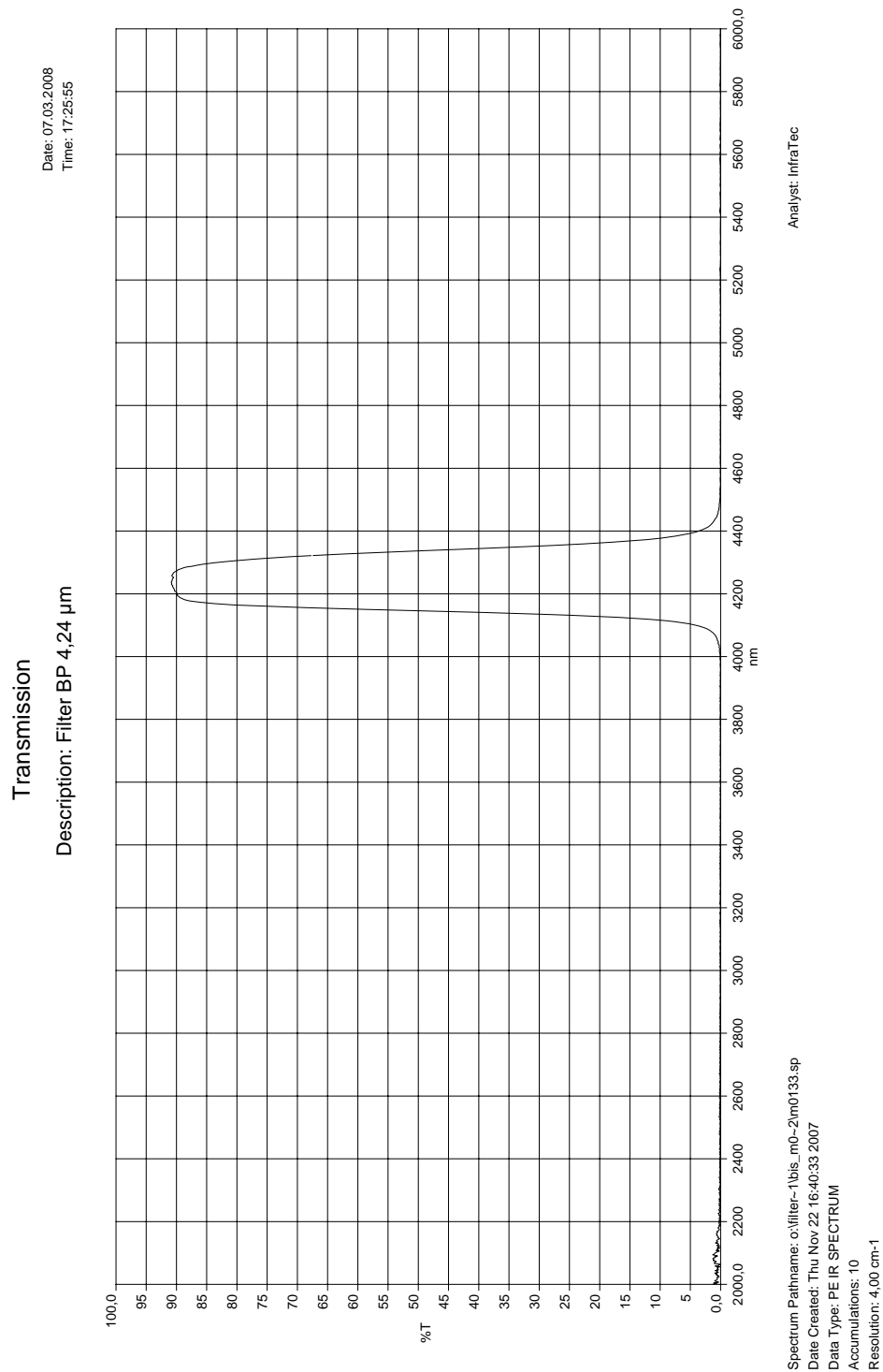


Abbildung C.1.: Transmissionsspektrum der eingesetzten Filters

D. Absorptionskoeffizienten

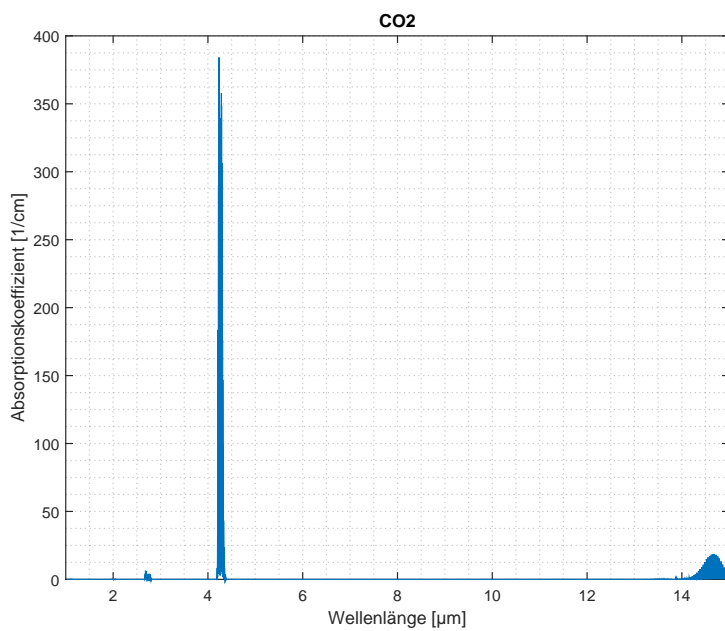


Abbildung D.1.: Absorptionskoeffizient des CO_2

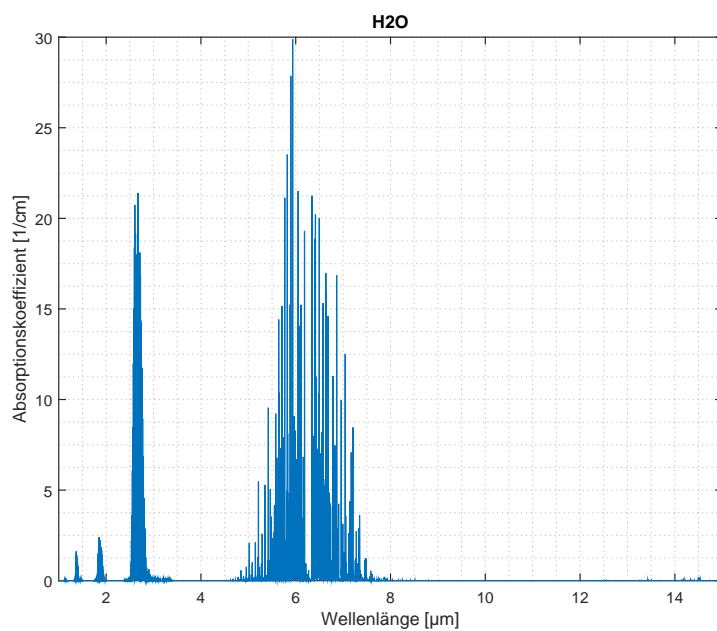


Abbildung D.2.: Absorptionskoeffizient von Wasser

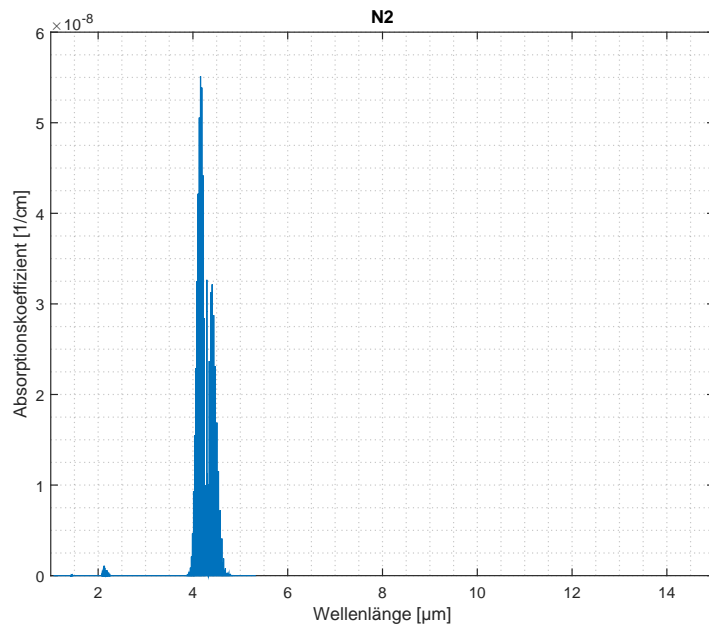


Abbildung D.3.: Absorptionskoeffizient von Stickstoff

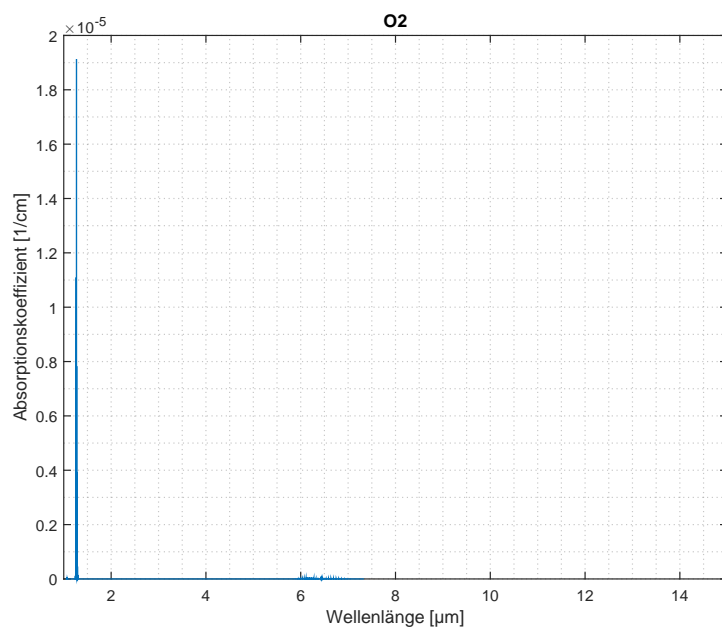


Abbildung D.4.: Absorptionskoeffizient von Sauerstoff

Literaturverzeichnis

- [Abu11] Mohammed Abuhamad, *Spektrale Information in der Thermographie*, Ph.D. thesis, Universität des Saarlandes, 2011.
- [AH10] Spiros Alexopoulos and Bernhard Hoffschmidt, *Solar tower power plant in Germany and future perspectives of the development of the technology in Greece and Cyprus*, *Renewable Energy* **35** (2010), no. 7, 1352–1356.
- [Ahl13] Nils Ahlbrink, *Modellgestützte Bewertung und optimierung der offenen Luftrezeivertechnologie*, Ph.D. thesis, RWTH Aachen, 2013.
- [Anw09] Ildikó Jancskárné Anweiler, *Nonlinear extension of heat equation and infrared imagery*, Ph.D. thesis, University of Pannonia, 2009.
- [Bau07] Norbert Bauer, *Handbuch zur industriellen Bildverarbeitung: Qualitätssicherung in der Praxis*, Fraunhofer-Allianz Vision, 2007.
- [BCM05a] Antoni Buades, Bartomeu Coll, and Jean-Michel Morel, *A non-local algorithm for image denoising*, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on, vol. 2, IEEE, 2005, pp. 60–65.
- [BCM05b] Antoni Buades, Bartomeu Coll, and Jean-Michel Morel, *A review of image denoising algorithms, with a new one*, *Multiscale Modeling & Simulation* **4** (2005), no. 2, 490–530.
- [BEW⁺15] Andre Bauknecht, Benjamin Ewers, Christian Wolf, Friedrich Leopold, Jianping Yin, and Markus Raffel, *Three-dimensional reconstruction of helicopter blade-tip vortices using a multi-camera bos system*, *Experiments in Fluids* **56** (2015), no. 1.
- [BKE⁺95] James C Brailean, Richard P Kleihorst, Serafim Efstratiadis, Aggelos K Katsaggelos, and Reginald L Lagendijk, *Noise reduction filters for dynamic image sequences: A review*, *Proceedings of the IEEE* **83** (1995), no. 9, 1272–1292.
- [BL92] A. Bagai and J. G. Leishman, *Technical notes: Improved wide-field shadowgraph set-up for rotor wake visualization*, *Journal of the American Helicopter Society* **37** (1992), no. 3, 86–92.
- [Bän02] Werner Bäni, *Wavelets : eine einföhrung für ingenieure*, Oldenbourg, München, 2002.
- [CB76] Genevieve Comte-Bellot, *Hot-wire anemometry*, *Annual Review of Fluid Mechanics* **8** (1976), no. 1, 209–231.
- [Cho89] Y.-C. Cho, *Digital image velocimetry*, *Applied Optics* **28** (1989), no. 4, 740–748.
- [CW94] Ian P Castro and Giles FS Wiggs, *Pulsed-wire anemometry on rough surfaces, with application to desert sand dunes*, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **52** (1994), 53–71.

- [DFE07] Kostadin Dabov, Alessandro Foi, and Karen Egiazarian, *Video denoising by sparse 3d transform-domain collaborative filtering*, Proc. 15th European Signal Processing Conference, vol. 1, 2007, p. 7.
- [DFG⁺72] S. Debrus, M. Francon, C. P. Grover, M. May, and M. L. Roblin, *Ground glass differential interferometer*, Applied Optics **11** (1972), no. 4, 853–857.
- [DFKE07] Kostadin Dabov, Alessandro Foi, Vladimir Katkovnik, and Karen Egiazarian, *Image denoising by sparse 3-d transform-domain collaborative filtering*, Image Processing, IEEE Transactions on **16** (2007), no. 8, 2080–2095.
- [DSBJC⁺95] LB Da Silva, TW Barbee Jr, R Cauble, P Celliers, D Ciarlo, S Libby, RA London, D Matthews, S Mrowka, JC Moreno, et al., *Electron density measurements of high density plasmas using soft x-ray laser interferometry*, Physical Review Letters **74** (1995), no. 20, 3991.
- [Eck97] H Eckelmann, *Einführung in die strömungsmesstechnik*, Teubner, Stuttgart, 1997.
- [Erh08] Angelika Erhardt, *Einführung in die digitale bildverarbeitung*, Vieweg+Teubner, 2008.
- [ESR15] ESRL, *Recent global monthly mean co₂*, August 2015.
- [Eth96] David Etheridge, *Building ventilation : theory and measurement*, John Wiley & Sons, Chichester New York, 1996.
- [FSY05] Chunli Fan, Fengrui Sun, and Li Yang, *Investigation on nondestructive and evaluation of pipelines using infrared thermography*, Infrared and Millimeter Waves, IEEE, 2005.
- [Gem15] Gemini Observatory, *Ir transmission spectra*, online, Abrufdatum 12.10.2015, 2015.
- [GGLS05] D Gruppi, S Guernier, F Leopold, and H Schäfer, *Mehrfarben-hintergrundschlieren-technik (cbos) zur vermessung der lichtablenkung von dichtegradienten*, Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmechanik (2005), 28–1–28–8.
- [GJ92] Ehud Gartenberg and A. Sidney Roberts Jr., *Twenty-five years of aerodynamic research with infrared imaging*, Journal of Aircraft **29** (1992), no. 2, 161–171.
- [Gmb11] InfraTec GmbH, *Benutzerhandbuch: Irbis® 3*, InfraTec GmbH, 2011.
- [GP93] DN Gordge and RH Page, *Infrared imagery of an air/co₂ axisymmetric jet*, Experiments in fluids **14** (1993), no. 6, 409–415.
- [Gro03] Sargent & Lundy LLC Consulting Group, *Assessment of parabolic and trough and power and tower solar and technology cost and performance forecasts*, Tech. report, National Renewable Energy Laboratory, 2003.
- [GS07] Erik Goldhahn and Jörg Seume, *The background oriented schlieren technique: sensitivity, accuracy, resolution and application to a three-dimensional density field*, Experiments in Fluids **43** (2007), no. 2-3, 241–249.

- [GWE09] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, and Steven L. Eddins, *Digital image processing using matlab*, Gatesmark Publishing, United States, 2009.
- [HLSW11] Michael J. Hargather, Michael J. Lawson, Gary S. Settles, and Leonard M. Weinstein, *Seedless velocimetry measurements by schlieren image velocimetry*, AIAA Journal **49** (2011), no. 3, 611–620.
- [HMOVdA05] WK Harteveld, RF Mudde, and HEA Van den Akker, *Estimation of turbulence power spectra for bubbly flows from laser doppler anemometry signals*, Chemical engineering science **60** (2005), no. 22, 6160–6168.
- [HSM11] John Howell, Robert Siegel, and Pinar Mengüç, *Thermal radiation heat transfer*, CRC Press, Boca Raton, Fla, 2011.
- [IEA14] *Technology roadmap solar thermal electricity*, IEA, 2014.
- [IEA15] *Energy technology perspectives 2015 mobilising innovation to accelerate climate action*, IEA, 2015.
- [Inf10] InfraTec GmbH, *Bedienhandbuch: Infrarot-thermografiekamera imageir*, InfraTec GmbH, 2010.
- [IO97] Terumi Inagaki and Yoshizo Okamoto, *Diagnosis of the leakage point on a structure surface using infrared thermography in near ambient conditions*, NDT&E International **30** (1997), no. 3, 135–142.
- [ISE15] Fraunhofer ISE, *Current and future cost of photovoltaics. long-term scenarios for market development, system prices and lcoe of utility-scale pv systems*, Tech. report, Agora Energiewende, 2015.
- [JI06a] I Jancskar and A Ivanyi, *Wavelet analysis of ir-images of a turbulent steam flow*, ICHMT DIGITAL LIBRARY ONLINE **10** (2006).
- [JI06b] I. Jancskar and A. Iványi, *Fuzzy-rule based smoothing of thermal images*.
- [JI07] I Jancskar and A Ivanyi, *Inverse analysis for radiating components in a free turbulent steam jet*, Proceedings of the Eleventh International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, 2007, pp. 1–22.
- [JLSX10] Hui Ji, Chaoqiang Liu, Zuwei Shen, and Yuhong Xu, *Robust video denoising using low rank matrix completion*, Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on, IEEE, 2010, pp. 1791–1798.
- [JMJH96] Char Jir-Ming and Yeh Jun-Hsien, *The measurement of open propane flame temperature using infrared technique*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer **56** (1996), no. 1, 133 – 144.
- [Koc15] Roman V. Kochanov, *Hitran application programming interface (hapi) - user guide*, 2015.
- [Kov12] Leslie SG Kovasznay, *The hot-wire anemometer in supersonic flow*, Journal of the Aeronautical Sciences (Institute of the Aeronautical Sciences) **17** (2012), no. 9.

- [Köp72] U. Köpf, *Application of speckling for measuring the deflection of laser light by phase objects*, Optics Communications **5** (1972), no. 5, 347–350.
- [KSH⁺09] Gerrit Koll, Peter Schwarzbözl, Klaus Hennecke, Thomas Hartz, Mark Schmitz, and Bernhard Hoffschmidt, *The solar tower juelich- a research and demonstration plant for central receiver systems*, Proceedings SolarPACES, 2009.
- [KW09] Chung-Chia Kang and Wen-June Wang, *Fuzzy reasoning-based directional median filter design*, Signal Processing **89** (2009), no. 3, 344–351.
- [Leo07] F. Leopold, *The application of the colored background oriented schlieren technique (cbos) to free-flight and in-flight measurements*.
- [Lor92] S. D Lord, *Nasa technical memorandum 103957*.
- [LYS03] Amanda W. Lewis, Sam T.S Yuen, and Alan J.R. Smith, *Detection of gas leakage from landfills using infrared and thermography - applicability and limitations*, Waste Management & Research **21** (2003), 436–447.
- [LZJ12] Peng Lu, Hua Zhang, and Xianwen Jing, *The effects of different hitran versions on calculated long-wave radiation and uncertainty evaluation*, Acta Meteorologica Sinica **26** (2012), 389–398.
- [Mat06] Mathworks, *wiener2*, 2006.
- [MAT15] MATLAB, *colormap*, 2015, abgerufen am 16.12.2015.
- [MCC⁺87] R Miles, C Cohen, J Connors, P Howard, S Huang, E Markovitz, and G Russell, *Velocity measurements by vibrational tagging and fluorescent probing of oxygen*, Optics Letters **12** (1987), no. 11, 861–863.
- [MCM⁺89] RB Miles, JJ Connors, EC Markovitz, PJ Howard, and GJ Roth, *Instantaneous profiles and turbulence statistics of supersonic free shear layers by raman excitation plus laser-induced electronic fluorescence (relief) velocity tagging of oxygen*, Experiments in fluids **8** (1989), no. 1-2, 17–24.
- [Mei02] G. Meier, *Computerized background-oriented schlieren*, Experiments in Fluids **33** (2002), no. 1, 181–187.
- [MQ15] Daniel Maldonado Quinto, *Konvektive verluste an offenen volumetrischen solarstrahlungsempfängern*, Ph.D. thesis, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2015.
- [MZZ⁺93] Richard B Miles, Deyu Zhou, Boying Zhang, Walter R Lempert, and Zhen-Su She, *Fundamental turbulence measurements by relief flow tagging*, AIAA journal **31** (1993), no. 3, 447–452.
- [Nit06] Wolfgang Nitsche, *Strömungsmesstechnik*, Springer, Berlin u.a, 2006.
- [NLTH13] N.H. Ngo, D. Lisak, H. Tran, and J.-M. Hartmann, *An isolated line-shape model to go beyond the voigt profile in spectroscopic databases and radiative transfer codes*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer **129** (2013), 89 – 100.

- [NPSY03] V Narayanan, RH Page, and J Seyed-Yagoobi, *Visualization of air flow using infrared thermography*, Experiments in fluids **34** (2003), no. 2, 275–284.
- [Off14] Matthias Offergeld, *Erprobung eines tracer-messverfahrens zur bestimmung der lufrückführtrate bei offenen volumetrischen receiveern von solarturmkraftwerken*, Diplomarbeit, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2014.
- [PM90] Pietro Perona and Jitendra Malik, *Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion*, Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on **12** (1990), no. 7, 629–639.
- [Qua13] Volker Quaschnig, *Regenerative energiesysteme: Technologie-berechnung-simulation*, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2013.
- [Raf15] Markus Raffel, *Background-oriented schlieren (bos) techniques*, Exp Fluids (2015).
- [RBP02] Manuel Romero, Reiner Buck, and James E. Pacheco, *An update on solar central receiver systems, projects, and technologies*, Journal of Solar Energy Engineering **124** (2002), no. 2, 98–108.
- [RFK73] Isaac Reif, Velmer A. Fassel, and Richard N. Kniseley, *Spectroscopic flame temperature measurements and their physical significance i. theoretical concepts a critical review*, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy **28** (1973), no. 3, 105 – 123.
- [RGB⁺13] L.S. Rothman, I.E. Gordon, Y. Babikov, A. Barbe, D. Chris Benner, P.F. Bernath, M. Birk, L. Bizzocchi, V. Boudon, L.R. Brown, and et al., *The hitran2012 molecular spectroscopic database*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer **130** (2013), 4–50.
- [RHRH⁺11] Markus Raffel, Ricardo Hernandez-Rivera, Benjamin Heine, Andreas Schröder, and Karen Mulleners, *Density tagging velocimetry*, Experiments in Fluids **51** (2011), no. 2, 573–578.
- [RHS⁺14] Markus Raffel, James T. Heineck, Edward Schairer, Friedrich Leopold, and Kolja Kindler, *Background-oriented schlieren imaging for full-scale and in-flight testing*, J Am Helicopter Soc **59** (2014), no. 1, 1–9.
- [RR01] H. Richard and Richard. Raffel, *Principle and applications of the background oriented schlieren (bos) method*, Measurement Science and Technology **12** (2001), 1576–1585.
- [RRM00] M. Raffel, H. Richard, and G. E. A. Meier, *On the applicability of background oriented optical tomography for large scale aerodynamic investigations*, Experiments in Fluids **28** (2000), 447–481.
- [Sch04] Wolfgang Schröder, *Fluidmechanik*, Mainz, Aachen, 2004.

- [SYLL14] Ling Shao, Ruomei Yan, Xuelong Li, and Yan Liu, *From heuristic optimization to dictionary learning: a review and comprehensive comparison of image denoising algorithms*, Cybernetics, IEEE Transactions on **44** (2014), no. 7, 1001–1013.
- [TBC⁺14] Jonathan Tennyson, Peter F Bernath, Alain Campargue, Attila G Császár, Ludovic Daumont, Robert R Gamache, Joseph T Hodges, Daniel Lisak, Olga V Naumenko, Laurence S Rothman, et al., *Recommended isolated-line profile for representing high-resolution spectroscopic transitions (iupac technical report)*, Pure and Applied Chemistry **86** (2014), no. 12, 1931–1943.
- [Thi14] William Thielicke, *The flapping flight of birds: Analysis and application*, Ph.D. thesis, 2014.
- [TR15] A. Tiddens and M. Röger, *Ir-basierte geschwindigkeitsfeldbestimmung*, 2015.
- [TRSH15] Arne Tiddens, Marc Röger, Hannes Stadler, and Bernhard Hoffschmidt, *A tracer gas leak rate measurement method for circular air circuits*, Flow Measurement and Instrumentation (2015).
- [TS14] William Thielicke and Eize J. Stamhuis, *Pivlab - towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in matlab*, Journal of Open Research Software 2 (2014), no. 30, 1–10.
- [UIS05] Hironobu Ueki, Masahiro Ishida, and Daisaku Sakaguchi, *Investigation of droplet disintegration in diesel spray core by advanced laser 2-focus velocimeter*, Tech. report, SAE Technical Paper, 2005.
- [UNY85] Hiroki Uchiyama, Masato Nakajima, and Shinichi Yuta, *Measurement of flame temperature distribution by ir emission computed tomography*, Appl. Opt **24** (1985), no. 23, 4111–4116.
- [VDI13] VDI, *Vdi-wärmeatlas*, Imprint Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [VHS05] Gaurav Vasudeva, Damon R. Honnery, and Julio Soria, *Non-intrusive measurement of a density field using the background oriented schlieren(bos) method*, Fourth Australian Conference on Laser Diagnostic in Fluid Mechanics and Combustion, 2005.
- [VM10] Michael Vollmer and Klaus-Peter Möllmann, *Infrared thermal imaging - fundamentals, research and applications*, WILEY-VCH Verlag Gmb & Co., 2010.
- [vSSRH15] Henrik von Storch, Hannes Stadler, Martin Roeb, and Bernhard Hoffschmidt, *Efficiency potential of indirectly heated solar reforming with open volumetric solar receiver*, Applied Thermal Engineering **87** (2015), 297–304.
- [Wei98] Joachim Weickert, *Anisotropic diffusion in image processing*, vol. 1, Teubner Stuttgart, 1998.
- [Wes93] Jerry Westerweel, *Digital particle image velocimetry : theory and application*, Delft University Press, Delft, Netherlands, 1993.

- [Wes97] J Westerweel, *Fundamentals of digital particle image velocimetry*, Measurement Science and Technology **8** (1997), 1379–1392.
- [Wes13] Viktor Wesselak, *Regenerative energietechnik*, Springer-Verlag, 2013.
- [WG91] C.E. Willert and M. Gharib, *Digital particle image velocimetry*, Experiments in Fluids **10** (1991), 181–193.
- [WMBC10] Alexander Wong, Akshaya Mishra, Kostadinka Bizheva, and David A Clausi, *General bayesian estimation for speckle noise reduction in optical coherence tomography retinal imagery*, Optics express **18** (2010), no. 8, 8338–8352.
- [YBR⁺06] Howard W Yoon, Meredith H Brenner, Joseph P Rice, Nathaniel R Briggs, and Greg Gillen, *Flow visualization of heated co2 gas using thermal imaging*, Defense and Security Symposium, International Society for Optics and Photonics, 2006, pp. 62050U–62050U.